



Titre: Apport des méthodes électriques à la détermination de la structure interne d'une halde à stériles
Title: interne d'une halde à stériles

Auteur: Rachid Intissar
Author:

Date: 2009

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Intissar, R. (2009). Apport des méthodes électriques à la détermination de la structure interne d'une halde à stériles [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/8470/>
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8470/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche:
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

NOTE TO USERS

This reproduction is the best copy available.

UMI[®]

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

APPORT DES MÉTHODES ÉLECTRIQUES À LA DÉTERMINATION DE LA
STRUCTURE INTERNE D'UNE HALDE À STÉRILES

RACHID INTISSAR
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MINÉRAL)

JUIN 2009



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*
ISBN: 978-0-494-53929-3
Our file *Notre référence*
ISBN: 978-0-494-53929-3

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

APPORT DES MÉTHODES ÉLECTRIQUES À LA DÉTERMINATION DE LA
STRUCTURE INTERNE D'UNE HALDE À STÉRILES

Présenté par : INTISSAR Rachid

En vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

A été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BUSSIÈRE Bruno, Ph.D., président

M. CHOUTEAU Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. AUBERTIN Michel, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. GIROUX Bernard, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Michel Chouteau pour la qualité de son encadrement, ses nombreux conseils et sa disponibilité. Je le remercie beaucoup pour sa confiance et son soutien sans faille tout au long de ce travail.

Je suis aussi particulièrement reconnaissant envers Monsieur Michel Aubertin qui m'a permis de réaliser ce travail, et qui en a assuré la codirection. Malgré ses lourdes fonctions en tant que titulaire de la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en environnement et gestion des rejets miniers, il s'est toujours montré très disponible et attentif à mon travail. Je tiens à le remercier tant pour ses compétences scientifiques que pour ses qualités humaines.

Je tiens aussi à remercier les responsables de la mine QIT-Fer et Titane filiale de Rio-Tinto pour avoir permis à ce projet de voir le jour. Je remercie également les partenaires de la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en environnement et gestion des rejets miniers pour leur aide financière.

Je souhaite également remercier Messieurs Abderrezak Bouchedda et Bernard Giroux pour leur aide efficace tout au long de ce travail ainsi que tous mes autres collègues du laboratoire de géophysique.

Un grand merci, bien sûr, à toute l'équipe du laboratoire de la Chaire d'environnement et gestion des rejets miniers pour leur accueil et leurs contributions, et particulièrement à Nicolas Pepin, Noura El-Harak, Thomas Papst, Vincent Martin, et tous ceux qui ont contribué à rendre agréable la période des essais au laboratoire.

RÉSUMÉ

Les haldes à stériles sont des empilements de roches stériles produites par l'activité d'extraction pour atteindre le minerai. Ces haldes sont quelques fois la source d'une eau de drainage minier acide (DMA) ou d'un drainage neutre contaminé (DNC) associé à la présence de sulfures métalliques dans les stériles. Les eaux de DMA sont habituellement caractérisées par un faible pH, une acidité élevée, ainsi qu'une concentration élevée en métaux lourds. De nombreux métaux tels que le nickel, le zinc, le cobalt et l'arsenic, sont également solubles à un pH proche de la neutralité. Ils peuvent ainsi constituer une source de contamination des effluents de la halde sans la présence de conditions acides. La halde Petit Pas de la mine Tio (QIT-Rio Tinto) fait face à ce problème de drainage neutre contaminé (DNC). La concentration de nickel dans ses effluents dépasse occasionnellement la limite définie dans les normes prescrites. Afin de comprendre comment le nickel est libéré autour de la halde, la mine a entrepris des études sur l'hydrogéologie et la géochimie de la halde.

Dans ce cadre, l'objectif de notre étude consiste à cartographier les zones de rétention d'eau qui sont souvent associées à une granulométrie plus fine, et à définir les éléments de la structure interne des stériles dans la halde (l'histoire de sa construction est peu connue). La structure interne a une influence significative sur la circulation de l'eau et de l'air dans les roches stériles. Ces deux éléments sont les principaux responsables des problématiques environnementales associées aux haldes contenant des minéraux réactifs.

Une campagne géophysique préliminaire menée préalablement à ce projet (en 2005) sur la halde Petit Pas a montré la présence d'une couche superficielle hétérogène et résistante (600 à 2000 $\Omega.m$) ayant une épaisseur d'environ 25 m. Une couche plus profonde et plus conductrice ($\sim 100 \Omega.m$) a été aussi détectée. Les chargeabilités mesurées y sont assez fortes (50 à 250 ms) avec une distribution assez uniforme, indiquant la présence d'une concentration importante de particules métalliques au sein

des stériles. Ces caractéristiques sont confirmées, du moins en partie, par les mesures réalisées pour notre projet.

Avant la réalisation de nos mesures sur la halde, nous avons conduit un ensemble de mesures des propriétés hydro-géotechniques et électriques en laboratoire. Ces mesures ont été réalisées sur des stériles au laboratoire de la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en Environnement et gestion des rejets miniers. L'analyse granulométrique de l'échantillon reçu en vrac en 2007 (granulométrie déjà tronquée) a montré que le coefficient d'uniformité, C_U , est de l'ordre de 45, indiquant que la distribution est très étalée. La conductivité hydraulique à saturation (k_{sat}), mesurée pour des matériaux avec des particules < 19 mm, est de l'ordre de 10^{-2} cm/s. La mesure des courbes de rétention d'eau pour les mêmes matériaux, obtenues à l'aide de la méthode par drainage en colonne avec démontage par couches, a montré que la pression d'entrée d'air ψ_a serait inférieure à 10 cm. La teneur en eau résiduelle θ_r mesurée pour les particules inférieures à 4.75 mm est de l'ordre de 7 %.

Des mesures des propriétés électriques ont aussi été réalisées en laboratoire sur un matériau avec des particules de taille inférieure à 10 mm. Ces mesures ont montré que les valeurs de résistivité sont faibles par rapport à celles déduites à l'aide de la loi d'Archie ou avec la loi de Waxman et Smits, particulièrement pour les faibles degrés de saturation. Ce comportement est expliqué principalement par la contribution de la conduction électronique à travers les particules métalliques. La résistivité des stériles varie presque linéairement avec la résistivité du liquide interstitiel. La chargeabilité mesurée est élevée (plus de 70 ms) et elle décroît faiblement avec le degré de la saturation, mais elle baisse fortement avec la conductivité du liquide interstitiel. Pour les degrés de saturation élevés et les fluides plus conducteurs, le courant a tendance à passer préférentiellement à travers l'électrolyte plutôt qu'à travers les interfaces particules/électrolyte, ce qui réduit la réponse en chargeabilité.

Au cours de l'été 2008, nous avons réalisé des mesures géophysiques sur la halde Petit Pas. Ces mesures incluent des levés de résistivité/chargeabilité avec un écartement entre électrodes de 2 m pour l'investigation de la proche surface (responsable de

l'infiltration) et des levés avec un écartement de 10 m pour l'investigation de la halde en profondeur. La proche surface montre une distribution de résistivité assez hétérogène reflétant l'hétérogénéité de la couche superficielle. Des anomalies de haute résistivité sont mises en évidence et seraient associées à des zones poreuses (peu denses) retenant moins d'eau. La chargeabilité en proche surface montre des valeurs variant entre 20 à 90 ms. Ces valeurs sont similaires à celles mesurées au laboratoire. Les chargeabilités moindres observées localement peuvent également être associées à des zones moins minéralisées.

Les levés d'investigation en profondeur ont été positionnés sur la portion centrale de la halde (partie où l'accès est plus facile) avec un espacement de 20 m entre les profils selon une direction nord-ouest sud-est. Les mesures de résistivité ont montré une assez bonne corrélation latérale. La distribution de la résistivité est semblable à celle observée sur les levés réalisés en 2005. La première couche mise en évidence est assez hétérogène avec une épaisseur d'environ 30 m. Cette couche repose sur une autre plus conductrice (100 à 200 $\Omega.m$) ayant une épaisseur d'environ 20 m. Cette couche correspondrait à des stériles avec une granulométrie plus fine permettant de retenir plus d'eau. La dernière couche détectée est très résistante et non limitée en profondeur.

Les chargeabilités que nous avons mesurées sont un peu plus faibles que celles mesurées en 2005; elles varient entre 50 et 120 ms. Les chargeabilités élevées observées localement pourraient être associées à des zones partiellement saturées avec une teneur plus élevée en minéraux métalliques. Le comportement de la chargeabilité est usuellement différent de celui de la résistivité. À cet égard, la résistivité serait plus diagnostique que la chargeabilité pour la caractérisation de cette halde à stériles, puisque la résistivité semble être mieux liée à la teneur en eau que la chargeabilité.

Les méthodes électromagnétiques transitoires et le radar géologique ont également été testés sur la halde. Les résultats obtenus sont toutefois peu convaincants. Les sondages électromagnétiques sont distordus à cause des effets de polarisation provoquée, et ils montrent des inversions de signe pour la majorité des cas. L'atténuation des ondes

radar par effet d'absorption et de diffusion limite la profondeur d'investigation. Le faible rapport signal/bruit rend les sections radar difficiles à interpréter (présence de bruit, de réverbération et quasiment pas de structures). L'étude réalisée ici a donc permis d'identifier les méthodes les plus appropriées pour caractériser une halde de grande dimension, contenant des roches stériles minéralisées avec des propriétés électriques complexes. Ce travail a également permis de mieux définir les propriétés physiques des matériaux et d'identifier les principales caractéristiques de la structure interne de la halde.

ABSTRACT

Waste rock piles are made of waste rocks extracted to reach the ore. Such piles are sometimes source of Acid Mine Drainage (AMD) or Contaminated Neutral Drainage (CND) associated with the presence of sulphides in the waste rock. AMD is usually characterized by a low pH, a high acidity and high concentrations of heavy metals. Many metals such as nickel, zinc, cobalt and arsenic, are also soluble at a pH close to neutrality. These can be a source of contamination of the pile's effluents, without the presence of acidic conditions. The pile Petit Pas at the Tio mine QIT-Rio Tinto) is facing a problem of Contaminated Neutral Drainage (CND). The concentration of nickel in its effluents occasionally exceeds the limit prescribed. To understand how the nickel is released around the pile, the mine has undertaken studies on the hydrogeological and geochemical behavior of the pile.

In this context, the purpose of our study is to map the areas of water retention often associated with a smaller grain size, and to define the elements of the internal structure within the pile (the history of its construction is largely unknown). The internal structure within the pile has a significant influence on how water and air flow in the waste rock. These two elements are the main components responsible for the environmental concerns associated with waste rocks piles containing reactive minerals.

A preliminary geophysical campaign conducted on the pile Petit Pas (in 2005) showed the presence of a heterogeneous and resistive surface layer (600 to 2000 $\Omega\cdot\text{m}$) having a thickness of about 25 m. A deeper more conductive ($\sim 100 \Omega\cdot\text{m}$) layer was also detected. The chargeability values measured are quite high (50 to 250 ms) with a fairly uniform distribution, indicating the presence of a large concentration of metallic particles in the waste rock. These characteristics have been confirmed at least in part by the measurements conducted afterwards, during our project.

Prior to our survey on the pile, a set of measurements on the hydro-geotechnical and electrical properties on laboratory was conducted. These measurements were made on

waste rocks in the laboratory of the industrial NSERC Polytechnique UQAT chair on the Environment and mine wastes management. The grain size analyses of the bulk sample received in 2007 (size already truncated) showed that the coefficient of uniformity, C_U , is around 45, indicating that the distribution is very widely graded. The saturated hydraulic conductivity (k_{sat}) measured on samples with particles <19 mm is about 10^{-2} cm/s. The water retention curve measured on the same material, using the drainage column method showed that the pressure entry value Ψ_a is lower than 10 cm. The residual water content measured θ_r for particles smaller than 4.75 mm is about 7%.

Measurements of electrical properties were achieved in the laboratory on a material with particles smaller than 10 mm. The results show that the resistivity values are low compared to those derived using Archie's or Waxman and Smits's law, especially for a low degree of saturation. This behavior may be explained by the contribution of electronic conduction through the metal particles. The waste rock resistivity varies almost linearly with the resistivity of the interstitial fluid. Measured chargeability is high (more than 70 ms) and decreases slightly with the degree of saturation, but sharply with the conductivity of the interstitial fluid. For a high degree of saturation, the current has a tendency to move preferentially through the electrolyte rather than through the particles/electrolyte interface, which reduces the chargeability response.

During the summer of 2008, geophysical measurements were conducted on the lac Tio Petit Pas pile. The measures include electrical surveys with a spacing of 2 m between electrodes, to investigate the near surface (responsible for the infiltration). Other surveys were made with a spacing of 10 m for a more in-depth investigation of the pile. Near surface showed a heterogeneous resistivity distribution, reflecting the heterogeneity of the surface layer.

Some high-resistivity anomalies were identified, which could be associated with lower density areas holding less water. In the near surface, chargeability showed values ranging from 20 to 90 ms. These values are largely similar to those measured in the

laboratory. Lower chargeability observed locally may be associated with less mineralized zones.

The deep survey has been positioned on the central portion of the pile (where access is easier) with a spacing of 20 m between the profiles along a north-west south-east direction. The resistivity measurements showed a fairly good lateral correlation. The resistivity distribution is quite similar to that observed in surveys conducted in 2005. The top layer with a thickness of about 30 m is quite heterogeneous. Below, a more conductive (100 to 200 $\Omega\cdot\text{m}$) layer is found with a thickness of about 20 m. This layer could correspond to waste rock with a smaller grain size which tends to retain more water. The last detected layer is very resistive and not bounded at depth.

The chargeability measured are slightly lower than those measured in 2005; they vary between 50 and 120 ms. High chargeability measurements may be associated with partially saturated areas with a high content of metallic minerals. The chargeability response is usually different from the resistivity. In this regard, the resistivity would be a better diagnostic than chargeability for the characterization of this waste rocks pile, since it seems to be more dependent on water content than chargeability.

Transient electromagnetic methods (TEM) and ground penetrating radar were also applied on the pile. The results are however unconvincing. TEM surveys are distorted due to the effects of induced polarization, and these show signs of reversal for the majority of cases. The attenuation of radar waves, because of absorption and diffusion, limits the depth of investigation. The low signal to noise ratio makes radar sections difficult to interpret (presence of noise, reverberation and almost no structures).

This study has lead to the identification of the most appropriate methods to characterize a large pile containing mineralized waste rock having complex electrical properties. This work has also determined the materials physical properties and identified the main characteristics of the pile internal structure.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT.....	ix
TABLE DES MATIÈRES.....	xii
LISTE DES TABLEAUX.....	xvi
LISTE DES FIGURES.....	xix
LISTE DES SYMBOLES.....	xxxi
LISTE DES ANNEXES.....	xxxiv
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Généralité	1
1.2 Halde à Stériles.....	1
1.3 Drainage Minier Acide (DMA).....	4
1.4 Formation du Drainage Neutre Contaminé (DNC).....	6
1.5 Utilisation des méthodes géophysique pour la caractérisation des halde à stériles.....	7
1.6 Description du projet et du contenu du mémoire	10
CHAPITRE 2 : MÉTHODES GÉOPHYSIQUES	11
2.1 Méthode de résistivité électrique.....	11
2.1.1 Résistivité électrique des sols	11
2.1.2 Distribution du potentiel électrique dans le sol	14
2.1.3 Mesure de la résistivité électrique d'un sol	15
2.1.4 Tomographie électrique.....	17
2.1.5 Influence du dispositif de mesure.....	18
2.1.6 Influence des changements brutaux de résistivité sur les mesures	20
2.1.7 Inversion et interprétation des données de résistivité	22
2.2 Polarisation provoquée (PP).....	24
2.2.1 Généralités.....	24
2.2.2 Étude de potentiel d'électrode	26

2.2.3 Étude de potentiel de membrane.....	27
2.2.4 Mesure de l'effet PP dans le domaine temporel.....	28
2.3 Méthodes transitoires	29
2.3.1 Principe de la méthode TDEM.....	29
2.3.2 Mesure et interprétation des données TDEM.....	32
2.3.3 Effets perturbateurs des sondages TDEM.....	35
2.4 Radar géologique.....	37
2.4.1 Généralités.....	37
2.4.2 Principes d'utilisation du georadar.....	39
CHAPITRE 3 : MISE EN CONTEXTE ET ÉTUDES ANTÉRIEURES.....	41
3.1 Introduction	41
3.2 Étude antérieures	43
CHAPITRE 4 : MESURE DES PROPRIÉTÉS HYDRIQUES DES	
STÉRILES AU LABORATOIRE	50
4.1 Introduction	50
4.2 Analyse granulométrique	50
4.3 Détermination de la densité relative.....	54
4.4 Étude de la conductivité hydraulique à saturation	55
4.4.1 Mesures au laboratoire de k_{sat} (Colonne à paroi rigide).....	55
4.4.2 Écoulement de l'eau et modèles de prédiction	60
4.5 Essai de traceur.....	65
4.6 Essai de drainage.....	73
4.7 Démontage et Courbe de Rétention d'Eau (CRE)	75
4.7.1 Mesure de la courbe de rétention d'eau au laboratoire.....	75
4.7.2 Modèle de prédiction de la CRE.....	80
4.7.3 Comparaison des mesures avec les modèles de prédiction de la CRE	82
4.8 Détermination de la teneur en eau résiduelle	86
4.9 Discussion des résultats.....	89

CHAPITRE 5 : ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES STÉRILES... 91

5.1 Introduction	91
5.2 Équipements utilisés.....	91
5.3 Détermination des facteurs géométriques du système de mesure	96
5.4 Mesure des propriétés électriques des stériles.....	105
5.5 Étude de la résistivité en fonction du degré de saturation.....	109
5.6 Étude de la chargeabilité en fonction du degré de saturation.....	117
5.7 Mesures électriques sur des carottes de matériau issu de la mine.....	119
5.8 Discussion des résultats.....	123

CHAPITRE 6 : PRÉSENTATION DES MESURES GÉOPHYSIQUES

SUR LA HALDE 125

6.1 Introduction	125
6.2 Dispositifs utilisés	125
6.2.1 Mesures électriques	125
6.2.2 Dispositif de mesures au georadar.....	129
6.2.3 Dispositif de mesure pour la méthode EM transitoire (TDEM)	130
6.3 Mesures électriques.....	133
6.3.1 Investigation en proche surface.....	133
6.3.2 Effets des perturbations locales sur les mesures électriques.....	140
6.3.3 Investigation en profondeur	141
6.4 Autres mesures	146
6.4.1 Mesures transitoires.....	146
6.4.2 Mesures radar	151

CHAPITRE 7 : TRAITEMENT ET INTERPRÉTATION DES

DONNÉES..... 154

7.1 : Introduction.....	154
7.2 Traitement et interprétation des mesures PP en proche surface.....	154
7.2.1 Inversion 2D et interprétation des données de résistivité.....	154
7.2.2 Inversion 3D des données de résistivité en proche surface.....	166

7.2.3 Inversion 2D et interprétation des données de chargeabilité en proche surface	171
7.3 Traitement et interprétation des mesures PP pour l'investigation en profondeur	178
7.3.1 Inversion 2D et interprétation des mesures de résistivité	178
7.4 Modélisation 2D des données d'investigation en profondeur	194
7.5 Discussion des résultats.....	196
CHAPITRE 8 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	201
BIBLIOGRAPHIE	206
ANNEXES.....	216

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Caractéristiques principales des stériles dans chaque cellule expérimentale (adapté de Pepin, 2009).....	48
Tableau 4.1 : Résultats de la séparation granulométrique d'un échantillon de stériles de QIT (reçu au baril).....	51
Tableau 4.2 : Paramètres caractérisant les courbes granulométriques de la figure 4.1	53
Tableau 4.3 : Propriétés physiques de base des matériaux dans des colonnes montées.....	58
Tableau 4.4 : Exemple de données sur le montage de la colonne (passant 10 mm) avec le système d'électrode.....	59
Tableau 4.5 : Exemple de calcul de la surface spécifique.....	63
Tableau 4.6 : Comparaison des k_{sat} prédites et mesurées, pour les 4 colonnes montées.....	64
Tableau 4.7 : Paramètres de montage des deux colonnes pour les essais de traceur ...	70
Tableau 4.8 : Principaux paramètres d'écoulement pour la phase d'injection du traceur (passant 10 mm)	70
Tableau 4.9 : Données de démontage de la colonne du passant 10 mm (sans système d'électrodes)	76
Tableau 4.10 : Données de démontage de la colonne résiduelle.....	88

Tableau 5.1 : Analyse des stériles utilisés dans les essais du laboratoire en matière du soufre et carbone totaux	93
Tableau 5.2 : Résultats de l'analyse minéralogique, DRX, pour 6 échantillons de stériles d'anorthosite des fractions <6,3mm (matériau reçu en 2007) (tiré de Pepin, 2009).....	94
Tableau 5.3 : Résultats de l'analyse minéralogique, DRX, pour un échantillon des stériles d'ilménite (matériel reçu en 2006) (reçu de Pepin, 2008)	95
Tableau 5.4 : Résultats des mesures résistivité/chargeabilité, test avec de l'eau distillée d'une résistivité de 2257,3 Ω .m.....	99
Tableau 5.5 : Comparaison entre les potentiels mesurés et simulés pour les dispositifs utilisés : cas du test avec de l'eau distillée.....	101
Tableau 5.6 : Comparaison entre les facteurs géométriques calculés et déduits à l'aide du test avec de l'eau	102
Tableau 5.7 : Comparaison des concentrations dans l'eau avant et après une résidence de 15 jours dans les stériles.....	102
Tableau 5.8 : Caractéristiques des matériaux testés dans les cellules expérimentales de laboratoire (tiré de Plante, 2008).....	103
Tableau 5.9 : Propriétés des deux matériaux lors du montage.....	106
Tableau 5.10 : Degrés de saturation local pour les 4 niveaux d'électrodes	109
Tableau 5.11 : Valeurs estimées de la conductivité de surface.....	115
Tableau 5.12 : Mesure des propriétés électriques des carottes issues de la mine	122

Tableau 6.1 : Fenêtres d'intégration pour les taux de répétition 285 Hz et 75 Hz (tiré du manuel de Geonics, Protem-47D).....	132
Tableau 6.2 : Analyse des erreurs de mesure de la résistivité/PP, dans le cas des mesures en proche surface	139
Tableau 6.3 : Analyse des erreurs de mesure de la résistivité, investigation en profondeur	145

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Modèle conceptuel de construction des haldes à stériles (tiré de Aubertin et al., 20002a, 2005).....	3
Figure 1.2 : Présence du DMA sur le site de Manitou en Abitibi, QC, Canada (tiré du cours MIN 3313 : Environnement et gestion des rejets miniers)	4
Figure 1.3 : (a) Modèle électrique de la structure interne de la halde-(b) section synthétique inversée (issue du modèle proposé (a)) - (c) section inversée (mesures réelles) (adapté de Anterrieu, 2007).....	9
Figure 2.1: Variation de la résistivité d'un gabbro en fonction du pourcentage de la pyrite et la pentlandite (tiré du cours de prospection électrique de surface, Chapellier, 2000).....	14
Figure 2.2 : Représentation 3D de deux équipotentielle hémisphériques séparées par une petite distance ∂r autour d'une électrode de courant ponctuelle (d'après Reynolds, 1997)	15
Figure 2.3: Lignes de courant (en gras) et courbes équipotentielles (normales) induites par deux électrodes de courant C1 (+I) et C2 (-I) (adaptée de Reynolds, 1997)	16
Figure 2.4: Construction d'une pseudo-section électrique avec le dispositif Wenner α (tiré de Rey, 2005).....	18
Figure 2.5 : Diagramme de sensibilité des principaux dispositifs 2D utilisés pour mesurer la résistivité électrique d'un sol. Plus une zone est sombre, plus sa contribution à la mesure est importante. A et B représentent les électrodes de courant, M et N les électrodes de potentiel (tiré de Marescot, 2007).	19

Figure 2.6 : Equipotentielles et lignes de courant à proximité d'un corps résistant (bas) et d'un corps conducteur (haut) (tiré de Marescot, 2007)	21
Figure 2.7 : Effet des hétérogénéités en proche surface sur les mesures électriques (tiré de Lasfargues, 1957).....	21
Figure 2.8 : Résumé des principales étapes de l'inversion à l'aide du logiciel RES2DINV (tiré d'Anterrieu, 2006).....	24
Figure 2.9: Illustration de l'effet PP dû à l'obstruction d'un pore par une particule métallique (adapté de Chouteau et al., 2006)	27
Figure 2.10 : Principe de mesure de la chargeabilité pendant la décharge après la coupure du courant injecté (adapté de Chouteau et al., 2006)	29
Figure 2.11: Principe de la méthode TDEM. (a) Schématisation de la diffusion des boucles de courant dans le sol après la coupure du courant injecté. (b) La forme de l'onde de courant injectée avec la force électromotrice générée dans le sol lors de la coupure du courant. (c) Illustration de l'échantillonnage du signal mesuré. (adapté de McNeill, 1990).....	31
Figure 2.12: Exemple d'interprétation d'un sondage TDEM réalisé sur le bassin Sénégalais à l'aide du logiciel WingLink. (a) points rouges indiquent la variation de la résistivité apparente en fonction du temps, la courbe verte indique la variation de la résistivité apparente en fonction du temps calculée par inversion des mesures (échelle log-log), (b) modèle de couche (épaisseur-résistivité) obtenu par inversion (tiré de Intissar, 2007)	34
Figure 2.13: (a) représentation du principe de l'utilisation du GPR (b) les types d'ondes : (1) onde directe propagent dans l'air, (2) onde réfléchi le long de l'interface (3) onde diffractée par l'objet à taille réduite (tiré d'Annan, 2001)	40

Figure 3.1 : Site de la mine Tio sur la Côte Nord (tirée du rapport d'étude d'Abitibi Géophysique (# 05N853, 2005)	41
Figure 3.2: Photo aérienne d'une partie de la mine Tio, y compris la halde Petit-Pas.....	42
Figure 3.3: Localisation des profils électriques/PP et TEM réalisés en 2005	44
Figure 3.4 : Exemple de profils électriques réalisés en 2005 (adapté du rapport LGAP 2005, Chouteau et al, 2005).....	45
Figure 3.5 : Exemple de profils de chargeabilité réalisés en 2005 (adapté du rapport LGAP 2005, Chouteau et al, 2005)	45
Figure 3.6 : Exemple de sondage TDEM; les points noirs correspondent aux valeurs négatives, les cercles blancs aux valeurs positives, les deux axes sont en échelle logarithmique (adapté du rapport LGAP 2005-04, Chouteau et al, 2005).....	47
Figure 3.7 : a) Variation du pH en fonction du temps dans les sept cellules, b) variation de la concentration du nickel dans les conditions naturelles de surface (adapté de Pepin et al., 2008)	48
Figure 4.1 : Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie	52
Figure 4.2 : Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage des matériaux réutilisés (passant 19 mm d'anorthosite et le passant 10 mm d'ilménite)	58
Figure 4.3 : Valeurs de k_{sat} mesurée, charge variable et charge constante en fonction de k_{sat} prédite par les modèles KC et KCM	65

Figure 4.4 : Concentration normalisée en NaCl du fluide à la sortie en fonction du temps (passant 10 mm), essai à charge quasi-constante.....	67
Figure 4.5 : Débit à la sortie en fonction du temps (passant 10 mm)	67
Figure 4.6 : Concentration normalisée en NaCl du fluide à la sortie en fonction du temps (passant 19 mm), essai à charge quasi-constante.....	68
Figure 4.7 : Débit à la sortie en fonction du temps (passant 19 mm)	68
Figure 4.8 : Comparaison des courbes théoriques (selon l'équation de Ogata et Banks, 1961) et expérimentale (phase d'injection)	72
Figure 4.9 : Débit en fonction du temps lors des essais de drainage libre des colonnes.....	74
Figure 4.10 : Volume d'eau drainée en fonction du temps	74
Figure 4.11 : Comparaison des CRE des matériaux montés, (a) degré de saturation en fonction de la succion, (b) teneur en eau volumique en fonction de la succion.....	77
Figure 4.12 : Exemple de courbes lissées, les paramètres déduits du lissage sont données sur les courbes	78
Figure 4.13 : Comparaison de la granulométrie à différents niveaux (matériau du passant 19 mm).....	79
Figure 4.14 : Comparaison de la granulométrie à différents niveaux (matériau du passant 10 mm).....	80

Figure 4.15 : Comparaison des CRE mesurées et prédites; (a) degré de saturation en fonction de la succion, (b) teneur en eau volumique en fonction de la succion, colonne avec le passant 10 mm (sans système d'électrodes)	84
Figure 4.16: Comparaison des CRE mesurées et prédites; (a) degré de saturation en fonction de la succion, (b) teneur en eau volumique en fonction de la succion, colonne avec le passant 10 mm (avec système d'électrodes)	84
Figure 4.17 : Comparaison des CRE mesurées et prédites; (a) degré de saturation en fonction de la succion, (b) teneur en eau volumique en fonction de la succion, colonne avec le passant 19 mm	85
Figure 4.18 : Comparaison des CRE mesurée et prédite; (a) degré de saturation en fonction de la succion, (b) teneur en eau volumique en fonction de la succion, colonne avec le passant 10 mm (ilménite avec système d'électrodes)	85
Figure 4.19: Photo montrant le montage utilisé pour la mesure de la teneur en eau résiduelle	87
Figure 4.20 : Comparaison entre la teneur en eau résiduelle expérimentale et la CRE prédite selon le modèle MK	89
Figure 5.1 : (a) photo de la colonne après le montage, (b) vue de dessus de la colonne lors de la conception (c) photo de la tige centrale avec les électrodes circulaires	92
Figure 5.2 : Numérotation des électrodes utilisées dans les mesures avec une illustration des dispositifs adoptés pour les mesures.....	93
Figure 5.3 : Analyse granulométrique des stériles testés au laboratoire	96
Figure 5.4 : Exemple de condition simulée avec le logiciel Comsol Multiphysics ...	100

Figure 5.5 : Exemple de variation des paramètres mesurés en fonction du temps. A) Variation de la conductivité électrique, B) Variation de la concentration en calcium, C) Variation de la concentration en soufre, D) Variation de la concentration en nickel (adapté de Plante et al., 2008) 104

Figure 5.6 : Profils de saturation, pour les deux colonnes, obtenus à l'aide de la méthode de démontage par couche (passant 10 mm d'anorthosite et d'ilménite) 108

Figure 5.7 : Résistivité en fonction du degré de saturation pour les deux types de stériles (mesure après le drainage à l'aide du dispositif équatorial dipôle-dipôle horizontal aux 4 niveaux d'électrodes) 111

Figure 5.8 : Valeurs de résistivité observées et calculées à l'aide de la loi d'Archie (équation 5.5), pour les deux cas étudiés 113

Figure 5.9 : Conductivité du matériau saturé en fonction de la conductivité du fluide interstitiel (mesures avec différents dispositifs) 114

Figure 5.10 : Valeurs des mesures et valeurs déduites de la loi de Waxman et Smits (é.q. 5.7) 116

Figure 5.11 : Résistivité en fonction de la hauteur de la colonne, mesure 24 h après le montage par couche, mesure à l'aide du dispositif dipôle-dipôle équatorial 117

Figure 5.12 : Chargeabilité en fonction du degré de saturation pour les deux types de stériles (mesure après le drainage à l'aide du dispositif dipôle-dipôle équatorial) 118

Figure 5.13 : Chargeabilité du matériau en fonction de la résistivité du fluide interstitiel mesure pour l'anorthosite 119

Figure 5.14 : Schéma explicatif de la méthode de mesure de la résistivité dans le cas des carottes (tiré de Telford et al, 1976)	120
Figure 6.1 : (a) Schéma d'une onde de courant émise avec le résistivimètre (b) période de mesure de la chargeabilité.	127
Figure 6.2 : Principales composantes du système RAMAC (tiré de Campos, 2004)	130
Figure 6.3: Principales composantes du système TDEM Geonics - (1) émetteur TEM47 - (2) récepteur Protem - (3) boucle de réception d'une surface équivalente de 31.4 m ² (adaptée du manuel de Geonics, Protem-47D)	131
Figure 6.4 : Plan de localisation des travaux effectués sur la halde Petit Pas en 2008	134
Figure 6.5 : Vue des zones de travaux effectués sur la halde Petit Pas en 2008	135
Figure 6.6 : Plan des levés superficiels, montrés sur la figure 6.5, avec leur dénomination.....	136
Figure 6.7: Pseudo-sections des mesures de résistivité apparente, zone I	137
Figure 6.8: Pseudo-sections des mesures de chargeabilité apparente, zone I	137
Figure 6.9 : Pseudo-sections des mesures de résistivité apparentes, zone II	138
Figure 6.10: Pseudo-sections des mesures de chargeabilité apparentes, zone II	138
Figure 6.11 : Résultats de la modélisation avec des blocs conducteurs proches des électrodes-(a) modèle de couches considéré -(b) pseudo-section de résistivité apparente calculée pour le modèle montré en (a) -(c) résultat d'inversion de la	

pseudo-section de résistivité apparente calculée sans la présence des blocs conducteurs -(d) résultat d'inversion de la pseudo-section montrée en (b)	141
Figure 6.12: Plan de localisation des mesures de résistivité pour l'investigation en profondeur avec leur dénomination (voir aussi figures 6.4 et 6.5).....	142
Figure 6.13: Pseudo-sections des mesures de résistivité, profondeur d'investigation de 60 m (25 niveaux).....	143
Figure 6.14: Pseudo-sections des mesures de chargeabilité, profondeur d'investigation de l'ordre de 60 m (25 niveaux)	144
Figure 6.15 : Plan d'emplacement des sondages électromagnétiques transitoires sur la halde le long des levés électriques, P3W-E et P4W-E	146
Figure 6.16 : Données brutes des sondages TDEM effectués en 2008	148
Figure 6.17 : Données brutes des sondages TDEM effectués en 2008 (suite).....	149
Figure 6.18 : Données brutes des sondages TDEM effectués en 2008 (suite et fin)	149
Figure 6.19 : Données brutes des sondages TDEM effectués en 2007	150
Figure 6.20 : Données brutes des sondages TDEM effectués en 2007 (suite et fin) .	150
Figure 6.21 : Images radar brutes, investigation en proche surface.....	152
Figure 7.1 : Comparaison des calculs d'inversion pour les quatre séquences décrites ci-dessus appliquées au cas du profil P5W-E; les erreurs de reproduction sont inférieures à 2.3 %	158

Figure 7.2 : Résultats des calculs d'inversion des mesures de résistivité effectuées sur la zone I en utilisant la séquence de traitement numéro 1. Le profil P5W-E est situé à 1 m de la paroi de la tranchée 3. Le profil P3W-E passe au dessus du bassin d'infiltration 1 161

Figure 7.3 : Résultats des calculs d'inversion des mesures de résistivité au niveau de la zone II en utilisant la séquence de traitement 1. Les lignes en trait tiretés rouges délimitent la couche conductrice 163

Figure 7.4 : Photo de la paroi de la tranchée 3 montrant des stratifications inclinées..... 164

Figure 7.5 : Résultat de la modélisation (a) modèle avec substratification inclinée (b) pseudo-section calculée (c) section obtenue par inversion de la pseudo-section (b) 165

Figure 7.6 : Comparaison entre une section obtenue par inversion 2D (a) et celle obtenue par inversion 3D (b); cas du levé P2W-E 168

Figure 7.7 : Comparaison entre une section obtenue par inversion 2D (a) et celle obtenue par inversion 3D (b); cas du levé P3W-E 169

Figure 7.8 : Comparaison entre la section obtenue par inversion 2D (a) et celle obtenue par inversion 3D (b) ; cas du levé L2 170

Figure 7.9 : Comparaison entre la section obtenue par inversion 2D (a) et celle obtenue par inversion 3D (b) ; cas du levé L3 170

Figure 7.10 : Comparaison des comportements de la chargeabilité avec le temps pour différents niveaux : (a) courbes de décroissance de la chargeabilité pour 4 points de mesures situés sur les 3 premiers niveaux; (b) courbes de décroissance

de la chargeabilité pour 4 points de mesures situés sur les niveaux plus profonds
(> 4) 172

Figure 7.11 : Variation de la chargeabilité apparente globale le long de deux
profils pour les quatre premiers niveaux des pseudo-sections (cas des levés
P1W-E et L1) 173

Figure 7.12 : Réponses calculées en chargeabilité, données de la zone I, les
mesures sont reproduites avec les réponses calculées avec des faibles RMS. La
couleur rouge indique les fortes chargeabilités. 175

Figure 7.13 : (a) section de résistivité (b) section de chargeabilité.
Les anomalies A et A' indiquent un exemple où la résistivité et la chargeabilité
sont corrélées (cas du levé P5W-E 176

Figure 7.14 : Réponses calculées en chargeabilité, mesures de la zone II;
les couleurs jaune et rouge indiquent les fortes chargeabilités, les couleurs
vertes indiquent des chargeabilités moindres. Les erreurs de reproduction
des mesures sont faibles ($< 2.5\%$) 177

Figure 7.15 : Plan montrant des profils d'investigation en profondeur au niveau
de la surface de la halde (voir aussi figures 6.4 et 6.5) 178

Figure 7.16 : Localisation des profils montrés sur la figure 7.17 avec leur
dénomination 179

Figure 7.17 : Comparaison de la topographie ancienne (1949) et actuelle
(2004) au niveau de la coupe schématisée dans les figures 7.15 et 7.16
(adapté du plan de localisation et systèmes d'écoulement souterrains) H1, H2 et
H3 représentent les positions des forages réalisés sur la halde. Les chiffres

1, 2, 3, 4 indiquent respectivement les points d'intersections de la coupe topographique avec les levés L1NW-SE, L2NW-SE, L3NW-SE et L4NW-SE 180

Figure 7.18 : Résultats des calculs d'inversion pour les quatre séquences (décrites dans le texte) appliquées au cas du profil L4NW-SE..... 183

Figure 7.19 : Sections de résistivité interprétées pour les 3 levés parallèles L1NW-SE, L2NW-SE, L4NW-SE. La couleur rouge indique les zones conductrices alors que le bleu foncé indique les zones résistives. Les lignes en trait tireté noir délimitent la couche conductrice..... 187

Figure 7.20 : Réponse de la résistivité calculée pour le profil LNE-SW. Les points M, N, O représentent les intersections avec les autres profils montrés dans la figure 7.21. Les lettres E et F indiquent des exemples d'anomalies résistives. 188

Figure 7.21 : Exemple de distribution de la sensibilité, calculée à l'aide du logiciel Res2Dinv dans le cas du profil L4NW-SE..... 188

Figure 7.22 : Exemple de profils électriques réalisés en 2005 (adapté du rapport LGAP 2005 04, Chouteau et al.,2005). Les lignes en trait tiretés rouge délimitent la couche conductrice 189

Figure 7.23 : Coupes verticales prélevées du modèle de résistivité 3D, l'erreur quadratique moyenne de reproduction des mesures est 5.5 après 10 itérations. Les lignes en trait tiretés noir délimitent la couche conductrice..... 191

Figure 7.24 : Réponses calculées de chargeabilité, pour les 3 levés parallèles soit L1NE-SW, L2NW-SE et L3NW-SE, avec les erreurs de reproductions (la profondeur d'investigation est d'environ 60 m). Les points M, N et M montrent les positions d'intersection avec le profil LNE-SW..... 193

Figure 7.25 : Réponse calculée en chargeabilité du profil LNE-SW. Les points M, N, et O montrent les points d'intersection respectivement avec les levés, L1NE-SW, L2NE-SW et L 4 NE-SW 194

Figure 7.26 : Résultat d'une modélisation pour le profil LNE-SW, (a) modèle de résistivité, (b) pseudo-section calculée, (c) section obtenue par inversion de la pseudo-section calculée, (d) section obtenue par inversion de la pseudo-section mesurée sur le terrain 195

Figure 7.27 : Résultat d'une modélisation pour le profil L4NW-SE, (a) modèle de résistivité, (b) pseudo-section calculée, (c) section obtenue par inversion de la pseudo-section calculée, (d) section obtenue par inversion de la pseudo-section mesurée sur le terrain 196

LISTE DES SYMBOLES

D_{10} = Diamètre correspondant à 10 % de la masse de l'échantillon (cm)

C_U = Coefficient d'uniformité d'une courbe granulométrique (-)

C_C = Coefficient de courbure d'une courbe granulométrique (-)

D_r = Densité relative d'un matériau (-)

K = Facteur géométrique

E = Champ électrique (V/m)

B = Induction magnétique (Tesla)

D = Déplacement diélectrique (C/m²)

k_{sat} = Conductivité hydraulique à saturation pour une charge constante ou variable (cm/s)

q = débit spécifique ou vitesse de Darcy (m/s)

D_d = Coefficient de diffusion moléculaire en milieu poreux (cm²/s)

g = Constante gravitationnel (9.81 m/s²)

J_C = Densité de courant de conduction (A/m²)

M_g = Chargeabilité globale donnée soit en mV/V ou bien en ms

i = Gradient hydraulique (-)

S = Surface spécifique des grains (m²/kg)

h_{co} = Remontée capillaire équivalente dans un milieu poreux (cm)

S_r = Degré de saturation (-)

V_x = Vitesse d'écoulement (cm/min)

L = Longueur de l'échantillon (cm)

R = Résistance électrique (en Ohm, Ω)

V = Vitesse des ondes radar

M = Chargeabilité dans le modèle Cole-Cole, $0 \leq m \leq 1$

H = Champ magnétique (A/m²);

I = Intensité du courant électrique traversant le dipôle (en Ampère, A)

$t_{adv} = L/V_x$ = temps d'advection (min)

$F = \phi^{-m}$ = Facteur de formation

TDS = Concentration totale de solides dissous

e = indice de vide (-)

C_G = Facteur de forme dans le modèle de KCM (0.1)

D_H = Diamètre équivalent des grains d'un matériau (cm)

n = Porosité dans le cas des mesures géotechniques (-)

θ = Teneur en eau volumique (-)

ω = teneur en eau massique (masse d'eau / masse du sol sec) (-)

μ_w = Viscosité dynamique de l'eau (10^{-3} Pa.s à 20°C)

γ_w = Poids volumique de l'eau (9.8 kN/m³)

ΔV = Différence de potentiel en (Volt, V)

ϕ : Porosité dans le cas des mesures électriques (-)

ρ_w = Résistivité du fluide interstitiel ($\Omega.m$)

ρ_{sat} = Résistivité d'un matériau à 100% de saturation ($\Omega.m$)

ρ_{app} = Résistivité apparente d'un matériau ($\Omega.m$)

μ_r = Perméabilité magnétique relative à celle de l'air (H /m)

σ = Conductivité électrique (S/m)

ϵ_r = Permittivité effective relative à la fréquence utilisée ($\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$).

c = constante qui caractérise la dépendance en fréquence du phénomène PP $0 \leq c \leq 1$

τ = Constante de temps pour l'effet PP (s)

$\frac{\partial B}{\partial t}$ = Dérivée partielle du champ magnétique secondaire, cas des mesures transitoire

(nV/A)

$\sigma_{surface}$ = Conductivité au niveau de surface des grains (S/m)

σ_{eff} = Conductivité effective du matériel (S/m)

ψ = Succion matricielle (cm)

ψ_r = Succion pour atteindre la teneur en eau résiduelle (cm)

ψ_{aev} = AEV = la pression d'entrée d'air

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Analyse des mesures TDEM et Radar effectuées sur la halde

Petit Pas.....216

Annexe 2 : CD ROM joint contient toutes les annexes citées dans le mémoire

avec l'ensemble de fichiers de mesures brutes, la topographie des

levés, les fichiers d'inversion 2D, 3D.....235

Chapitre 1 : Introduction

1.1 Généralité

L'industrie minière fait partie des industries les plus importantes au Canada, et le pays fait d'ailleurs parti des cinq premiers producteurs mondiaux de produits minéraux. Au point de vue environnemental, l'industrie minière est aussi l'une des industries les plus préoccupantes vu la quantité de rejets qu'elle génère. La prise de conscience pour la préservation de l'environnement a conduit le Canada à adopter une politique visant à protéger l'environnement tout en préservant l'activité industrielle. Un des enjeux de la protection de l'environnement face à l'industrie minière est le stockage de rejets et le maintien de l'intégrité de l'environnement autour des lieux de stockage.

L'exploitation des mines génère un volume très important de rejets miniers sans valeur commerciale. Ces derniers peuvent présenter des risques pour l'environnement selon leur état, leur composition et leur mode d'entreposage. Il existe principalement trois grandes catégories de rejets miniers (Aubertin et al, 2002a). La première catégorie correspond aux eaux des mines et les eaux d'infiltration. La qualité de ces eaux est influencée par plusieurs facteurs incluant la nature du minerai, les explosifs et les lubrifiants utilisés. La seconde catégorie comprend les rejets du concentrateur qui proviennent de l'étape de traitement minéralurgique servant à libérer les minéraux ayant une valeur commerciale. La troisième catégorie de rejets correspond aux roches sans valeur commerciale, appelées stériles. Ces derniers rejets sont issus des opérations d'extraction, de décapage et de l'excavation de la surface. Ce projet porte sur ce dernier type de rejets.

1.2 Halde à Stériles

Les haldes à stériles sont des amoncellements de roches concassées, pouvant parfois atteindre des dimensions considérables avec des hauteurs de plus de 100 m et des

superficies de plusieurs dizaines d'hectares (e.g. Anterrieu, 2006). Il existe quatre principales méthodes de construction des haldes (Aubertin et al. 2002a ; Fala, 2002) ;

- **Déversement à la benne**

Les stériles sont directement déversés à l'aide d'engin porteur le long de la crête de la halde. Avec cette méthode, on assiste à une ségrégation par effet de gravité qui est d'autant plus marquée que la hauteur et le pendage de la pente sont élevés. Les gros blocs roulent le long de la pente pour s'accumuler au pied de celle-ci, tandis que les particules fines restent près de la surface supérieure de la halde. La zone intermédiaire présente une granulométrie locale composée surtout de particules de taille moyenne.

- **Déversement avec épandage au butoir**

Avec cette méthode, les stériles sont déposés proche de la crête à l'aide d'engin porteur, puis poussés du haut de la pente par un béliet mécanique (Fala, 2002). La ségrégation est moins prononcée que pour la méthode précédente en raison de la faible énergie acquise par les stériles lors de la poussée avec le béliet.

- **Déversement à la benne avec régalage**

Pour cette méthode, les stériles sont déposés sous forme de tas sur la surface de la halde. Ces tas sont ensuite étendus afin de les niveler et compacter. Dans ce cas, la ségrégation est faible et le degré de compaction est plus élevé.

- **Dépôt par benne traînante**

Cette méthode est essentiellement utilisée dans les grosses mines à ciel ouvert, incluant notamment les mines de charbon (Aubertin et al, 2002a). Les stériles sont déposés directement sur l'empilement par la benne traînante. La ségrégation et la densité sont alors assez faibles.

Le choix d'une méthode de construction dépend de nombreux facteurs, tels que la topographie, les caractéristiques physicochimiques des stériles, les équipements disponibles, etc. Cependant, la méthode de construction influence beaucoup la

ségrégation granulométrique et le degré de compaction (Fala, 2002). À partir des méthodes usuelles de construction des haldes en roches dures, Aubertin et al (2002a, 2005) ont proposé un modèle conceptuel (figure 1.1) où le cœur de la halde présente une alternance subhorizontale de matériaux fins et denses avec d'autres plus grossiers et lâches. Les parties extérieures de la halde présentent des stratifications obliques avec une ségrégation granulométrique plus marquée.

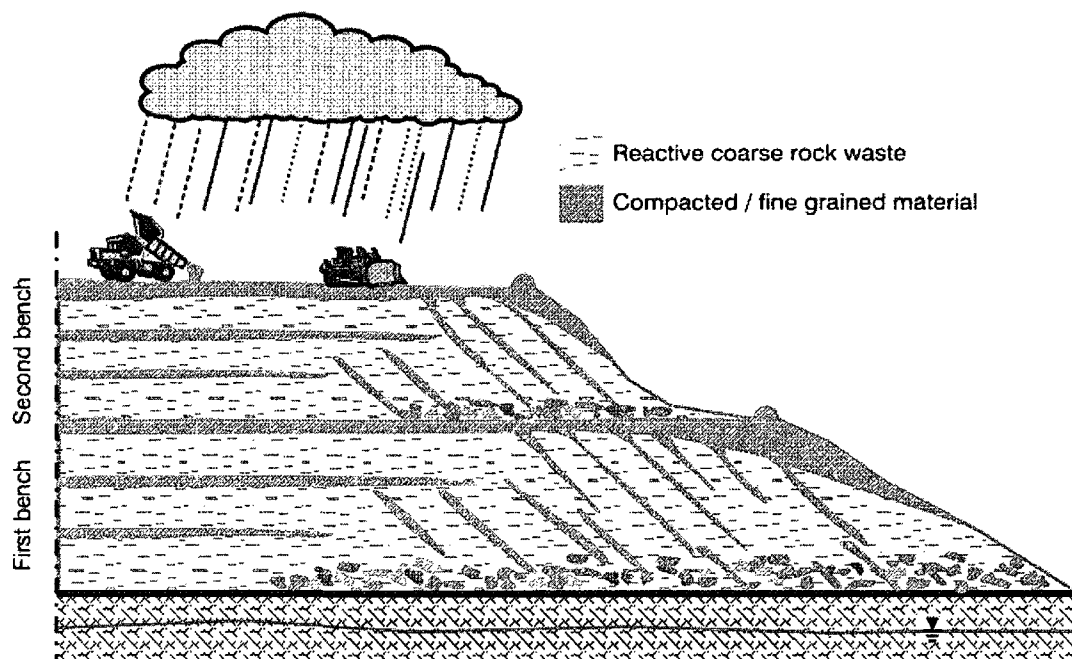


Figure 1.1 : Modèle conceptuel de construction des haldes à stériles (tiré de Aubertin et al, 20002a, 2005)

La ségrégation granulométrique, le type de stratification et le degré de compaction représentent les caractéristiques essentielles à étudier afin de comprendre le comportement physique et chimique des haldes. Ce comportement se manifeste via la capacité de rétention d'eau, le réseau d'écoulement interne ainsi que la stabilité géochimique et géotechnique de la halde.

Bien que les stériles n'aient pas de valeur commerciale, ils ne sont pas pour autant vides de minéraux. La circulation des eaux de surface et souterraines à travers ces

stériles produit ce qu'on appelle le drainage minier. Si les stériles contiennent des minéraux réactifs exposés à l'eau et à l'oxygène, il peut y avoir génération de drainage minier acide (DMA) ou drainage neutre contaminé (DNC).

Dans les sections qui suivent, nous discutons sommairement de ces phénomènes avec leurs conséquences sur l'environnement avoisinant.

1.3 Drainage Minier Acide (DMA)

Le DMA est connu mondialement pour les conséquences néfastes qu'il peut causer à l'environnement avoisinant. La figure 1.1 illustre un exemple des conséquences du DMA pour le site abandonné de Manitou.

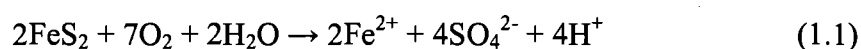


Figure 1.2 : Présence du DMA sur le site de Manitou en Abitibi, QC, Canada (tiré du cours MIN 3313 : Environnement et gestion des rejets miniers)

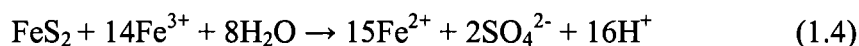
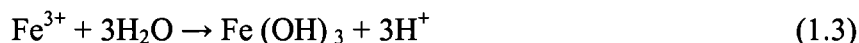
Ce phénomène est typiquement le résultat de la circulation des eaux sur la surface ou à travers une aire d'entreposage des rejets miniers (par exemple, une halde à stériles) contenant des minéraux sulfureux comme la pyrite (FeS_2), qui est de loin le minéral sulfureux le plus abondant. Les eaux du DMA sont caractérisées par un faible pH, des

concentrations élevées en métaux lourds, en sulfates solubles et autres solides dissous (e.g Aubertin et al, 2002a). Nous décrivons brièvement ici les réactions chimiques associées à l'oxydation de la pyrite.

L'oxydation de la pyrite peut être directe ou indirecte. L'oxydation directe se produit lors d'une réaction chimique (1.1) entre la pyrite à l'état solide, l'oxygène de l'air et l'eau :



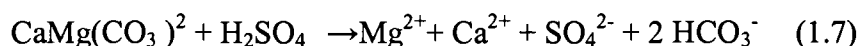
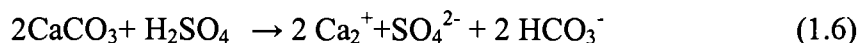
Cette réaction permet la libération des ions H^+ , entraînant une diminution du pH. Une deuxième réaction (1.2) entre le fer ferreux (Fe^{2+}) et l'oxygène peut produire le fer ferrique (Fe^{3+}) qui tend à précipiter sous la forme d'un hydroxyde de fer (1.3). À faible pH, le fer ferrique demeure en solution et devient un agent oxydant de la pyrite (1.4).



Ces réactions (regroupées dans l'équation 1.5) engendrent la production d'acide sulfurique (H_2SO_4). Dans les conditions acides, typiques au DMA, la présence des bactéries acidophiles joue un effet catalyseur en accélérant notamment le processus d'oxydation du fer ferreux en fer ferrique. On assiste alors à une augmentation du taux d'acidification et à la solubilisation des métaux lourds (Aubertin et al, 2002a).

La production du DMA peut être ralentie par la présence des minéraux acidivores dans les rejets miniers, tels que les carbonates et les silicates. Si tel est le cas, l'acide

généré par l'oxydation des sulfures (H_2SO_4) sera neutralisé lors des réactions avec les minéraux tampons. Les équations suivantes décrivent la neutralisation de l'acide sulfurique respectivement par la calcite et la dolomite (e.g Aubertin et al, 2002a).



La neutralisation est accompagnée par la génération des minéraux secondaires contenant par exemple des sulfates, des carbonates et du calcium ou du magnésium. Si l'ion HCO_3^- réagit avec le fer ferreux présent dans les rejets, ceci peut entraîner la précipitation de sidérite (FeCO_3) comme minéral secondaire (1.8).



L'ensemble de ces phénomènes qui vont entraîner ou non une contamination des effluents. Plus d'informations sur le DMA et le DNC sont présentées dans Aubertin et al (2002a) et dans les références qui y sont citées.

1.4 Formation du Drainage Neutre Contaminé (DNC)

Le phénomène du DNC est relativement peu étudié, comparativement au phénomène de DMA qui a reçu beaucoup d'attention tant au niveau de la prédiction, du contrôle et de la prévention (Nicholson, 2004). La baisse du pH dans le cas du DMA (induit par l'oxydation des minéraux sulfureux) est accompagnée par la mise en solution de plusieurs métaux composants des rejets miniers (Bussière et al, 2005). Cependant, de nombreux métaux tels que l'arsenic, le nickel, le zinc et le cobalt sont également solubles à pH près de la neutralité. Ceci induit le drainage neutre contaminé qui se définit comme étant la contamination des eaux circulant à travers les composantes d'un site minier par des éléments chimiques, mais sans la présence des conditions acides (Plante et al, 2008). Le problème réside ici dans la difficulté de faire précipiter ces éléments avec les conditions de pH retrouvées dans la nature; par exemple, pour

faire précipiter la quasi-totalité du zinc et du nickel dans un effluent le pH doit être augmenté respectivement à 9,5 et 8,5 (Bussière et al, 2005). Bien que l'impact sur l'environnement du phénomène de DNC soit plus faible que dans le cas du DMA, des conséquences négatives peuvent avoir lieu (particulièrement à long terme) si aucune mesure corrective n'est prise. Le site Wood Cadillac est un bon exemple de site générant le DNC avec une concentration d'arsenic très élevée (entre 100 et 600 µg/l), alors que le pH de l'effluent varie entre 6 et 9 (Bussière et al, 2008).

La halde à stériles Petit Pas de la mine Tio, sujet de ce projet, fait également face au problème de DNC. Dans ce cas, la concentration du nickel peut dépasser la limite permise dans la réglementation alors que le pH de l'effluent varie entre 6,5 et 9 (Plante et al, 2008). Des études préliminaires ont montré que le nickel dans les stériles de la halde Petit Pas est libéré principalement à partir de la dissolution du nickel associé à la pyrite, à la millérite (NiS) et aux sulfures associés à l'ilménite. Les études ont également montré que les stériles de la halde Petit Pas présentent un potentiel important de rétention des métaux par des phénomènes sorption (Plante et al, 2008 ; Pepin, 2009).

1.5 Utilisation des méthodes géophysique pour la caractérisation des halde à stériles

La structure interne des haldes à stériles a une influence significative sur le déplacement de l'eau et l'air à l'intérieur des roches stériles. L'historique de la construction des haldes est généralement peu connu. De plus, il peut y avoir des changements de la méthode de construction et les propriétés des stériles durant l'exploitation de la mine. La réalisation de forages d'observation et l'excavation de tranchées constituent l'approche directe la plus crédible pour déterminer la structure interne et les propriétés physiques et chimiques des stériles. Cependant, cette approche est coûteuse et délicate à mettre en œuvre à cause de la nature hétérogène des stériles. De plus, l'information obtenue dans le cas des forages reste locale. La nature

destructive des forages et des tranchées peut aussi perturber la structure dans les stériles. Dans ces conditions, les méthodes géophysiques offrent une alternative intéressante pour la caractérisation de la structure interne des haldes (e.g. Campos, 2004; Poisson, 2004). Les avantages de ces méthodes incluent leur nature non destructive, la facilité de mise en œuvre et le coût relativement plus faible par rapport aux forages. Néanmoins, ces méthodes présentent des limites au niveau du pouvoir de résolution et de la profondeur d'investigation.

Les méthodes électriques, électromagnétiques et le radar géologique basés respectivement sur la cartographie de la résistivité électrique et la permittivité diélectrique semblent les mieux adaptées à la caractérisation des haldes. Ces paramètres sont étroitement liés à la teneur en eau, à la concentration des particules minérales ainsi qu'à la nature des solides dissous.

Des études de caractérisation d'une halde à stériles à la mine Laronde (Agnico-Eagle Ltd), située en Abitibi, ont montré des résultats assez concluants (Campos, 2004; Anterrieu, 2006). Les mesures géophysiques réalisées sur cette halde d'une hauteur d'environ 25 m ont permis de cartographier plusieurs anomalies sur les pentes et au cœur de la halde avec des forts contrastes de la résistivité. Ces anomalies sont associées notamment à la ségrégation granulométrique et au niveau de compaction (résultants du mode de construction).

Anterrieu (2006) a couplé les résultats des mesures électriques avec des données issues de la géochimie et l'hydrogéologie pour proposer un modèle préliminaire de la structure interne de la halde (figure 1.3 a).

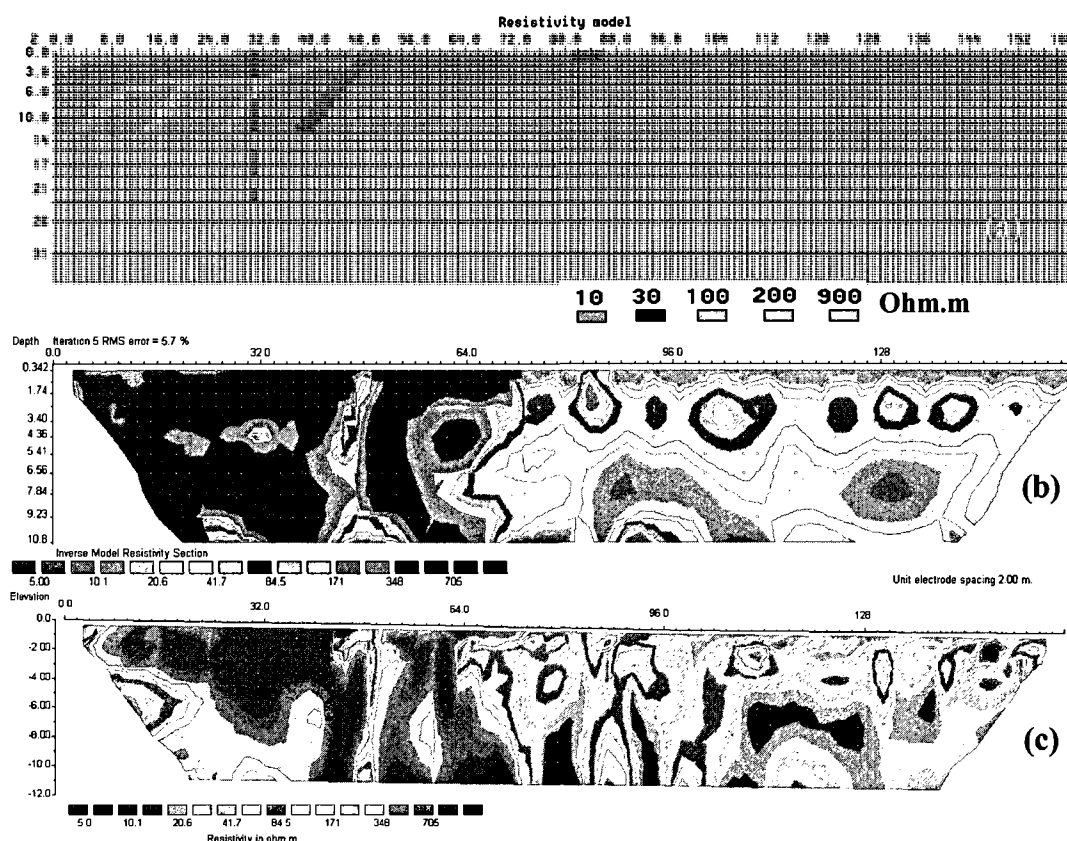


Figure 1.3 : (a) Modèle électrique de la structure interne de la halde-(b) section synthétique inversée (issue du modèle proposé (a)) - (c) section inversée (mesures réelles) (adapté d'Anterrieu, 2006)

Dans ce modèle, le banc supérieur ($h < 14\text{m}$) serait formé en partie d'une alternance de couches obliques résistives et conductrices. Cette alternance est causée par le déversement successif à partir de la crête entraînant la ségrégation des stériles. La ségrégation produit des couches composées de stériles grossiers (résistives) alternées avec d'autres composées de stériles plus fins (conductrices). La figure 1.3b montre la section synthétique inversée de la pseudo-section calculée à partir du modèle proposé (a). La figure 1.3c montre la section obtenue par inversion des mesures réalisée sur la halde. La corrélation entre la section issue du modèle proposé avec la section obtenue par mesure est assez bonne. De plus amples informations sont disponibles dans

Anterrieu (2006). Cet exemple illustre le potentiel d'application des méthodes géophysiques pour caractériser la structure interne d'une halde à stérile.

1.6 Description du projet et du contenu du mémoire

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'un travail plus global mené par la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en Environnement et gestion des rejets miniers. Il vise une caractérisation géophysique d'une portion de la halde à stériles Petit Pas de la mine Tio. Ce projet s'articule autour de trois parties principales. La première partie porte sur les mesures en colonne au laboratoire des propriétés géotechniques et électriques des stériles (conductivité hydraulique saturée, courbe de rétention d'eau, résistivité et chargeabilité, etc.). La deuxième partie est consacrée aux mesures géophysiques réalisées sur la halde (résistivité électrique/chargeabilité). Dans la troisième partie, une analyse détaillée des résultats obtenus est réalisée.

Ce mémoire est divisé en huit chapitres. Après l'introduction, le chapitre 2 présente la théorie relative aux techniques géophysiques utilisées pour l'investigation de la halde. Le chapitre 3 présente une mise en contexte du site ainsi que les travaux déjà réalisés au niveau de la halde. Le chapitre 4 traite des mesures au laboratoire des propriétés hydro-géotechniques des stériles. Le chapitre 5 est consacré aux propriétés électriques des stériles. Le chapitre 6 présente les appareils de mesure, les paramètres d'acquisition utilisés sur le terrain ainsi que les données brutes avec une analyse d'erreurs. Le chapitre 7 est consacré au traitement et analyse des mesures. Enfin, le chapitre 8 présente les principales conclusions ainsi que quelques recommandations.

Chapitre 2 : Méthodes géophysiques

Dans ce chapitre, nous allons détailler la théorie relative aux différentes méthodes géophysiques utilisées lors de ce projet. Il s'agit de la méthode de résistivité électrique, la polarisation provoquée, le radar géologique ainsi que la méthode électromagnétique transitoire. Les méthodes électriques ont été largement utilisées dans ce travail. De ce fait, elles sont présentées avec plus de détails dans ce chapitre.

2.1 Méthode de résistivité électrique

2.1.1 Résistivité électrique des sols

Dans un système solide-eau, la conductance électrique peut être définie comme étant la combinaison de deux contributions différentes. Il s'agit de la conductance électrolytique de l'eau dans les pores et la conductance électronique ou métallique des solides analogue à celle des métaux dans les gisements des minéraux.

✓ Conductibilité électrolytique

La conductibilité électrolytique est prépondérante dans la plupart des types de sol, car les grains de la matrice eux mêmes sont de médiocres conducteurs électriques. Cela signifie que ce sont les ions en solution qui transportent des charges sous l'effet du champ électrique. Les sols conduisent donc le courant électrique grâce à l'eau qu'ils contiennent. La résistivité d'un sol (ou d'une roche stérile) va dépendre alors de différents facteurs :

▪ Porosité

La porosité est définie comme étant le rapport entre le volume des vides et le volume total de l'échantillon. Pour un échantillon saturé par un fluide donné, quand la porosité décroît, la résistivité doit croître.

Archie (1942) a relié la résistivité électrique ρ d'un sol saturé à la résistivité électrique ρ_w du fluide interstitiel par la relation :

$$\rho_{app} = a \rho_w \phi^{-m} \quad (2.1)$$

où ϕ est la porosité, a et m sont des constantes dépendant du type de sol et ρ_w est la résistivité du fluide interstitiel. Cette équation montre que la résistivité électrique d'un sol saturé est sensible à la porosité, à la résistivité électrique du fluide interstitiel, aux caractéristiques des solides et à la structure des pores (c'est-à-dire que différents sols avec les mêmes ρ_w et ϕ peuvent avoir différentes valeurs de a et m). La constante m est connu sous le nom de facteur de cimentation et varie entre 1.4 et 2.2 pour les sables propres et les graviers contenus dans les couches aquifères (Huntley, 1986). Cependant, la loi d'Archie ne s'applique pas rigoureusement pour les sols contenant une fraction argileuse ou une concentration importante de particules métalliques à cause de deux phénomènes distincts. Dans les sols argileux, la conductivité électrique se produit dans les pores et sur la surface des particules d'argiles via la double couche ionique diffuse (Urish, 1981). Cette loi ne s'applique pas également lorsque le matériau est composé d'un pourcentage élevé de particules métalliques qui sont plus au moins en contact entre elles et présentent une conduction électronique importante qui s'ajoute à la conduction électrolytique (cas des gisements de métaux).

▪ Degré de saturation

La résistivité électrique dépend aussi du degré de saturation S_r ($=V_{\square}/V_v$) où V_{\square} est le volume de l'eau et V_v le volume des vides. La résistivité d'un sol non saturé ρ peut être reliée à celle d'un sol saturé ρ_{sat} (McNeill, 1990) comme suit :

$$\frac{\rho}{\rho_{sat}} = S_r^{-B} \quad (2.2)$$

où S_r est le degré de saturation et B est un paramètre empirique de l'ordre de 2. Cette équation montre que l'augmentation du degré de saturation entraîne une baisse de la résistivité électrique. Cette équation est applicable lorsque le degré de saturation est au dessus d'une valeur critique S_{cr} , qui correspond à la quantité minimale d'eau requise pour maintenir un film d'eau continu autour des particules solides. Il existe une valeur

critique de la teneur en eau volumique, comprise entre 20 et 30 % (cas d'argile) pour laquelle il se produit une augmentation rapide de la résistivité électrique (Razafindratsima et al, 2003; Parkhomenko, 1967). Cette valeur peut correspondre à la teneur en eau résiduelle dans le cas des roches stériles étudiés dans notre cas.

▪ Température

Lorsque la température augmente, la mobilité des ions augmente, puisque la viscosité de la solution diminue. Le gel augmente beaucoup la résistivité des roches; cependant l'effet peut être progressif car les sels en solution abaissent le point de congélation de l'électrolyte qui remplit les pores de la roche. Une roche stérile ou un sol totalement gelé est infiniment résistant (Chapellier, 2000). La résistivité électrique ρ_T d'un sol à la température $T(^{\circ}\text{C})$ peut être associée à une résistivité électrique standard mesurée à 18°C par (Keller et Frischknecht, 1966) :

$$\rho_T = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha(T - 18^{\circ})} \quad (2.3)$$

Où α est un paramètre empirique qui est approximativement de l'ordre de $0.025^{\circ}\text{C}^{-1}$.

✓ Conductibilité électronique

Pour la conductibilité électronique, le passage du courant se fait par déplacement d'électrons. Cette conductibilité du solide n'est réellement importante que pour certains minéraux tels que les sulfures métalliques (pyrite, galène), certains oxydes (comme la magnétite et l'hématite) ainsi que l'or, le graphite, l'argent, etc. (Chapellier, 2000). Pour que la résistivité d'une formation soit affecté par la présence de particules minérales, il faut que leur concentration soit suffisante et qu'ils soient jointifs afin d'améliorer le contact entre eux. La figure 2.1 montre un exemple de variation de la résistivité d'un gabbro en fonction du pourcentage en pyrite et pentlandite.

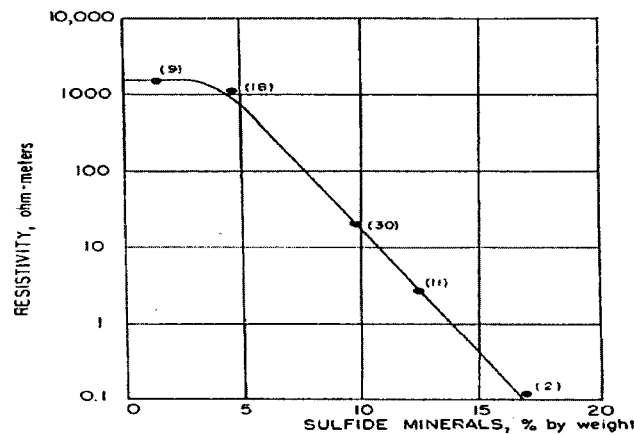


Figure 2.1: Variation de la résistivité d'un gabbro en fonction du pourcentage de la pyrite et la pentlandite (tiré du cours de prospection électrique de surface, Chapellier, 2000)

La figure 2.1 montre que la résistivité mesurée est très sensible à la teneur en particules métalliques. Elle se réduit d'un facteur de 10^4 en passant de 0 à 15 % de pyrite et pentlandite dans le gabbro. Les nombres entre parenthèses sur la figure 2.1 indiquent le nombre de mesures représentées en un seul point de valeur moyenne.

2.1.2 Distribution du potentiel électrique dans le sol

Dans le cas d'une source de courant ponctuelle située en surface d'un demi-espace infini homogène isotrope, la différence de potentiel ∂V entre deux équipotentiels hémisphériques séparées par une petite distance ∂r (figure 2.2) s'exprime selon l'équation (2.4) où ρ représente la résistivité, j la densité de courant sur la surface équipotentielle située à la distance r de la source, et I l'intensité du courant (Reynolds., 1997) (éq 2.4).

$$\frac{\partial V}{\partial r} = -\rho j \quad (2.4)$$

$$j = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.5)$$

Par intégration de (2.4), on obtient :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} + c \quad (2.6)$$

Comme $V=0$ quand le rayon r est très grand, $c=0$ et l'équation 2.6 se simplifie en :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2.7)$$

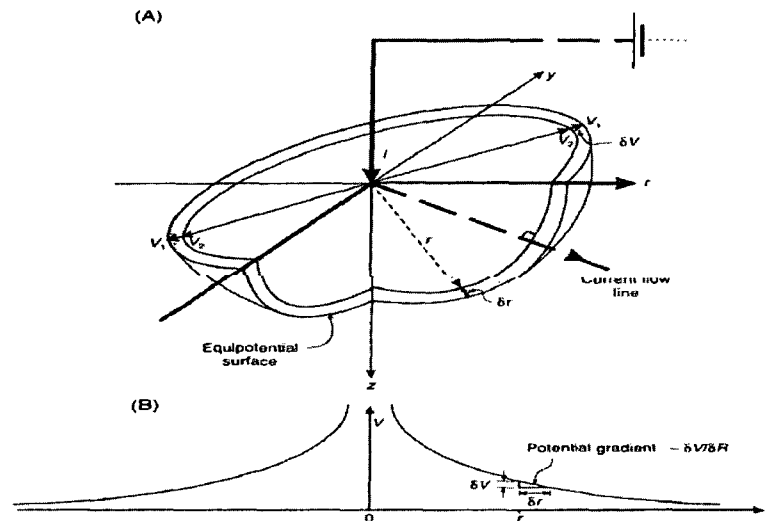


Figure 2.2 : Représentation 3D de deux équipotentiels hémisphériques séparées par une petite distance δr autour d'une électrode de courant ponctuelle (d'après Reynolds, 1997)

2.1.3 Mesure de la résistivité électrique d'un sol

En pratique, une mesure de la résistivité du sol nécessite 4 électrodes. Reliées à un générateur, deux des électrodes, dites de courant (C1, C2), font circuler dans le sol un courant continu d'intensité fixée et contrôlée par un ampèremètre. La différence de potentiel induite dans le sol par la circulation de ce courant est mesurée par un voltmètre relié aux deux autres électrodes dites de potentiel (P1, P2). L'ensemble (ampèremètre + voltmètre, éventuellement générateur de courant) est appelé résistivimètre.

La circulation d'un courant continu dans un demi-espace homogène infini entre 4 électrodes est représentée à la figure 2.3. Le courant entre dans le sol en un point C_1 ($+I$) et en sort par un point C_2 ($-I$). Le potentiel en un point M quelconque est la somme des contributions des sources C_1 et C_2 .

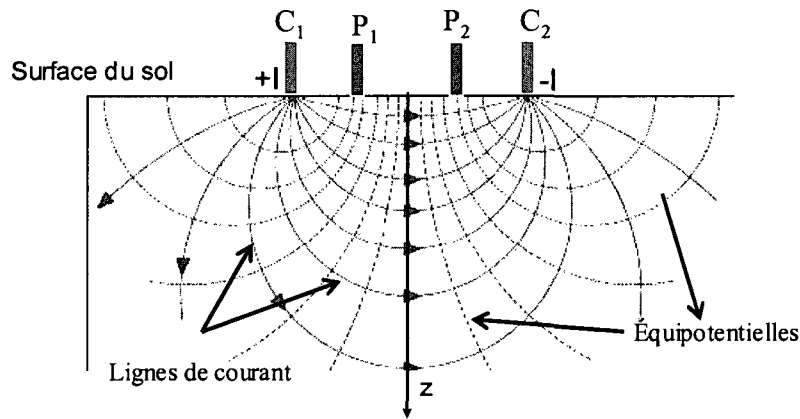


Figure 2.3: Lignes de courant (en gras) et courbes équipotentiellles (normales) induites par deux électrodes de courant C_1 ($+I$) et C_2 ($-I$) (adaptée de Reynolds, 1997)

La différence de potentiel entre P_1 et P_2 s'écrit alors (Reynolds, 1997) :

$$\Delta V = V(P_1) - V(P_2) = \frac{\rho I}{K} \quad (2.8)$$

où K est un facteur géométrique :

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} + \frac{1}{C_2 P_2} \right]^{-1} \quad (2.9)$$

Le facteur géométrique K dépend du dispositif de mesure utilisé, c'est-à-dire de la disposition relative des électrodes de courant et de potentiel. Dans le cas d'un dispositif Wenner alpha avec un espacement (a) entre électrodes, le facteur géométrique (K) équivaut à :

$$K = 6\pi a \quad (2.10)$$

La résistivité du demi-espace homogène vaut :

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2.11)$$

Lorsque le sol n'est pas homogène, la résistivité mesurée (2.11) est dite apparente (ρ_{app}) car elle diffère de la résistivité réelle ou intrinsèque du sol en un point particulier. La valeur de résistivité apparente obtenue lors d'une mesure résulte en effet de la contribution de chacune des portions infinitésimales de sol traversées par le courant injecté, en fonction de leur résistivité et de leur localisation par rapport aux sources de courant.

2.1.4 Tomographie électrique

La tomographie électrique vise à déterminer la distribution de la résistivité (réelle) du sol selon un plan généralement vertical (2D) ou dans un volume de sol (3D). La première étape de cette méthode d'investigation consiste à réaliser une série de mesures individuelles grâce à des électrodes métalliques enfoncées dans le sol, généralement le long d'un profil (2D). La longueur du profil, la profondeur de pénétration et la résolution désirée déterminent l'espacement minimum (a), entre deux électrodes adjacentes, et maximum ($n.a$), entre dipôle émetteur et dipôle récepteur, pour une acquisition donnée. Les mesures électriques sont réalisées selon une séquence prédéfinie. Les valeurs des résistivités apparentes ρ_{app} obtenues pour chacun des quadripôles de mesure sont reportées à l'aplomb du dispositif à une profondeur proportionnelle à la valeur (a). On parle alors de niveaux d'acquisition. Si l'espacement entre les électrodes augmente, la profondeur d'investigation augmente elle aussi. On peut alors représenter les résistivités apparentes mesurées sous la forme d'une pseudo-section qui reflète qualitativement la variation spatiale et verticale de la résistivité apparente (figure 2.4).

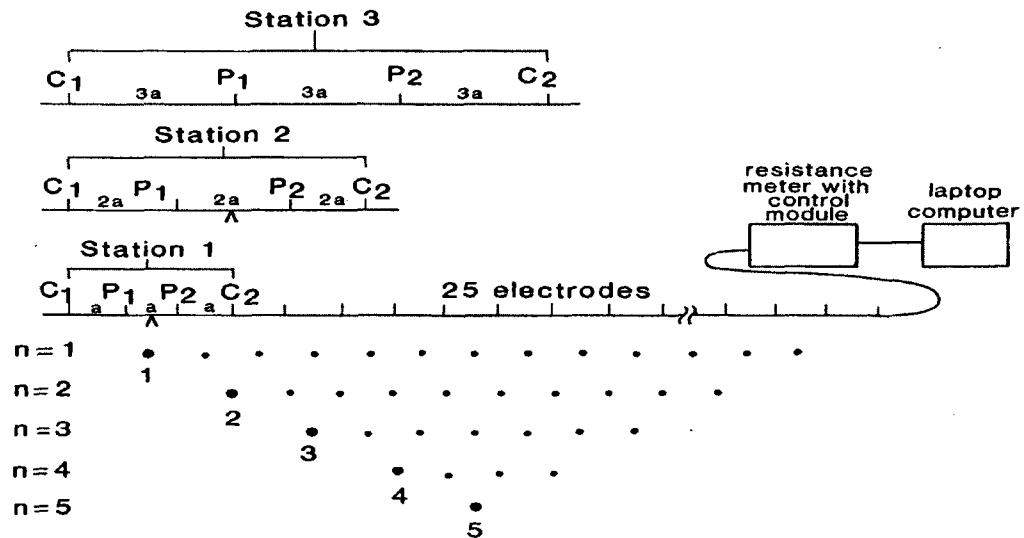


Figure 2.4: Construction d'une pseudo-section électrique avec le dispositif Wenner α (tiré de Rey, 2005)

2.1.5 Influence du dispositif de mesure

Le choix du dispositif de mesure dépend de l'objet géologique étudié et des objectifs recherchés (résolution spatiale, sensibilité au bruit, etc.). Chaque dispositif présente en effet des avantages et des inconvénients qui lui sont propres et qui sont liés à son diagramme de sensibilité (Reynolds, 1997).

Le diagramme de sensibilité d'un dispositif de mesure, qui est une expression graphique de sa matrice de sensibilité, nous permet de savoir à quel point les variations de la résistivité dans une région influenceront la mesure de la différence de potentiel ΔV . La figure 2.5 présente les diagrammes de sensibilité pour 3 dispositifs de mesure en 2D. Un dispositif Wenner sera plus sensible à une variation verticale de la résistivité (la fonction de sensibilité est étalée horizontalement) alors qu'un dipôle-dipôle sera influencé par une variation horizontale de la résistivité (fonction de sensibilité est étalée verticalement). Un dispositif Schlumberger présente un comportement intermédiaire. Ceci est surtout valable à grande distance des électrodes (Chapellier, 2000). Le dispositif Wenner est caractérisé par une bonne stabilité (faible

sensibilité aux courants parasites) tandis que les dispositifs dipôle-dipôle permettent d'obtenir une bonne résolution verticale (Rey, 2005).

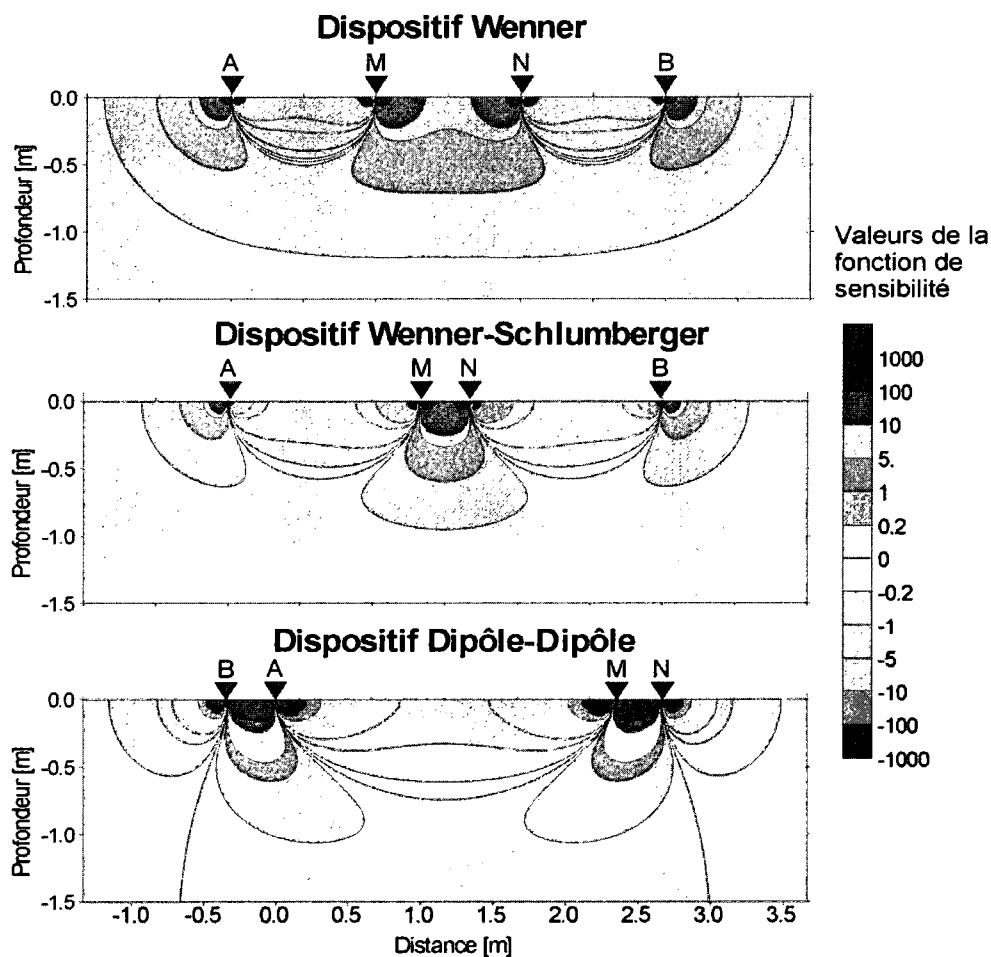


Figure 2.5 : Diagramme de sensibilité des principaux dispositifs 2D utilisés pour mesurer la résistivité électrique d'un sol. Plus une zone est sombre, plus sa contribution à la mesure est importante. A et B représentent les électrodes de courant, M et N les électrodes de potentiel (tiré de Marescot, 2007).

2.1.6 Influence des changements brutaux de résistivité sur les mesures

On appelle « à-coup de prise » la variation de la résistivité plus ou moins brutale que l'on note au passage d'une électrode d'émission du courant ou de la mesure du potentiel au-dessus d'une surface de discontinuité électrique. Par exemple, un corps conducteur va attirer et concentrer les lignes de courant; les équipotentielles seront pour leur part repoussées par le conducteur (figure 2.6, haut). À l'inverse, pour un corps résistant, les lignes de courant auront tendance à contourner les obstacles résistants et les équipotentielles se resserreront au voisinage et à l'intérieur de ce corps (figure 2.6, bas). La figure 2.7 montre un exemple de sondages sur un terrain composé d'une couche épaisse de résistivité ρ_1 reposant sur un substratum. Sur la couche superficielle, on note la présence d'un petit corps perturbateur de résistivité ρ_2 telle que $\rho_2 \ll \rho_1$. Dans cet exemple, l'acquisition est faite avec un dispositif Wenner en augmentant successivement la dimension du dispositif de telle façon que les électrodes occupent les positions indiquées en (1), (2), (3) et (4). La résistivité apparente varie dans le même sens que la densité du courant au centre du dispositif. La résistivité apparente présentera donc un maximum au passage des électrodes B et N sur le conducteur, lequel a tendance à canaliser en quelque sorte les lignes de courant (figure 2.7).

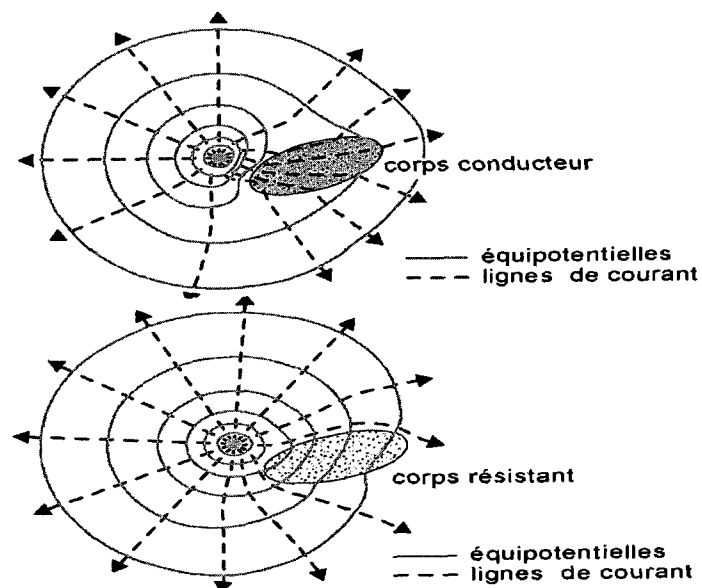


Figure 2.6 : Equipotentiellles et lignes de courant à proximité d'un corps résistant (bas) et d'un corps conducteur (haut) (tiré de Marescot, 2007)

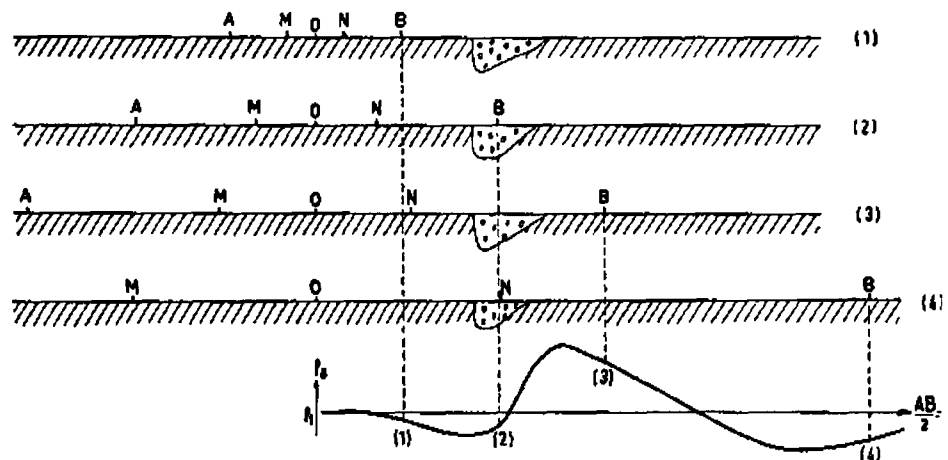


Figure 2.7 : Effet des hétérogénéités en proche surface sur les mesures électriques (tiré de Lasfargues, 1957)

2.1.7 Inversion et interprétation des données de résistivité

Afin d'obtenir la résistivité réelle du sol au droit des profils, les valeurs de résistivité apparente doivent être inversées (Reynolds, 1997). Le principe de l'inversion consiste à déterminer des modèles de sol (résistivité réelle) dont la réponse électrique reproduit les résistivités apparentes mesurées (pseudo-section). L'objectif de l'inversion est de déterminer la distribution de la résistivité ρ qui minimise l'écart entre la pseudo-section calculée pour un modèle de sol et la pseudo-section mesurée. Cet écart est généralement quantifié par le critère des moindres carrés (Root Mean Square, RMS, équation 2.12).

$$\text{Norme L2 : } RMS(\%) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\rho_{cal} - \rho_m)^2} \quad (2.12)$$

où ρ_{cal} et ρ_m représentent respectivement la résistivité apparente calculée et mesurée en chaque point de la pseudo-section. La fonction d'erreur (RMS) décrite par l'équation (2.12) correspond à la norme L2 ($\sim x_i^2$). La minimisation de cette fonction au cours du processus d'inversion a tendance à atténuer les contrastes, comparativement à l'utilisation d'une fonction d'erreur de type, norme L1 ($\sim |x_i|$) (éq. 2.13).

$$\text{Norme L1 : } \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\rho_{cal} - \rho_{mes}| \quad (2.13)$$

De nombreux algorithmes existent pour minimiser la fonction d'erreur (Loke et al., 1996; Loke et al., 2002) et tendre ainsi vers un modèle de sol permettant d'expliquer au mieux les mesures. Le modèle de sol obtenu au terme de l'inversion constitue une solution qui n'est pas nécessairement unique pour représenter la résistivité réelle du sol (Oldenburg et al, 1994).

L'inversion des pseudo-sections dans cette étude a été réalisée à l'aide du logiciel RES2DINV (Loke et Barker, 1996). Cet outil est largement utilisé dans les applications de prospection électrique pour l'environnement. Le logiciel génère d'abord un modèle initial du sous-sol avec une résistivité homogène composé de couches d'épaisseurs croissantes avec la profondeur. Cette résistivité homogène

initiale est calculée à chaque point de mesure en fonction des paramètres d'acquisition utilisés lors de la prise des mesures. L'épaisseur de la première couche est déterminée en fonction du dispositif utilisé et de l'espacement inter-électrodes. Les épaisseurs des autres couches augmentent de 10 % à 25% avec la profondeur selon le choix de l'utilisateur. Chaque couche est composée d'un certain nombre de cellules rectangulaires. À partir des informations incluses dans le fichier des mesures (notamment le type de dispositif de mesure et l'espacement inter-électrodes), le programme calcule la réponse du modèle en résistivité apparente (ρ_{cal}) aux positions des mesures. Le logiciel RES2DINV cherche alors à réduire l'écart entre des valeurs calculées et les valeurs mesurées (ρ_{mes}) en modifiant les résistivités du modèle. La réduction de cet écart se fait au sens des moindres carrés à l'aide d'un processus itératif. Les calculs de modélisation directe se font par différences finies ou éléments finis suivant le choix de l'utilisateur. La résistivité de chaque cellule du modèle est ainsi mise à jour après chaque itération. Lorsque l'écart entre la pseudo-section et le modèle calculé ne change plus de manière significative, le programme arrête le processus d'inversion en présentant le RMS qui renseigne d'une certaine manière sur la fiabilité du modèle du sous-sol déterminé. La figure 2.8 résume les principales étapes de l'inversion avec le logiciel RES2DINV.

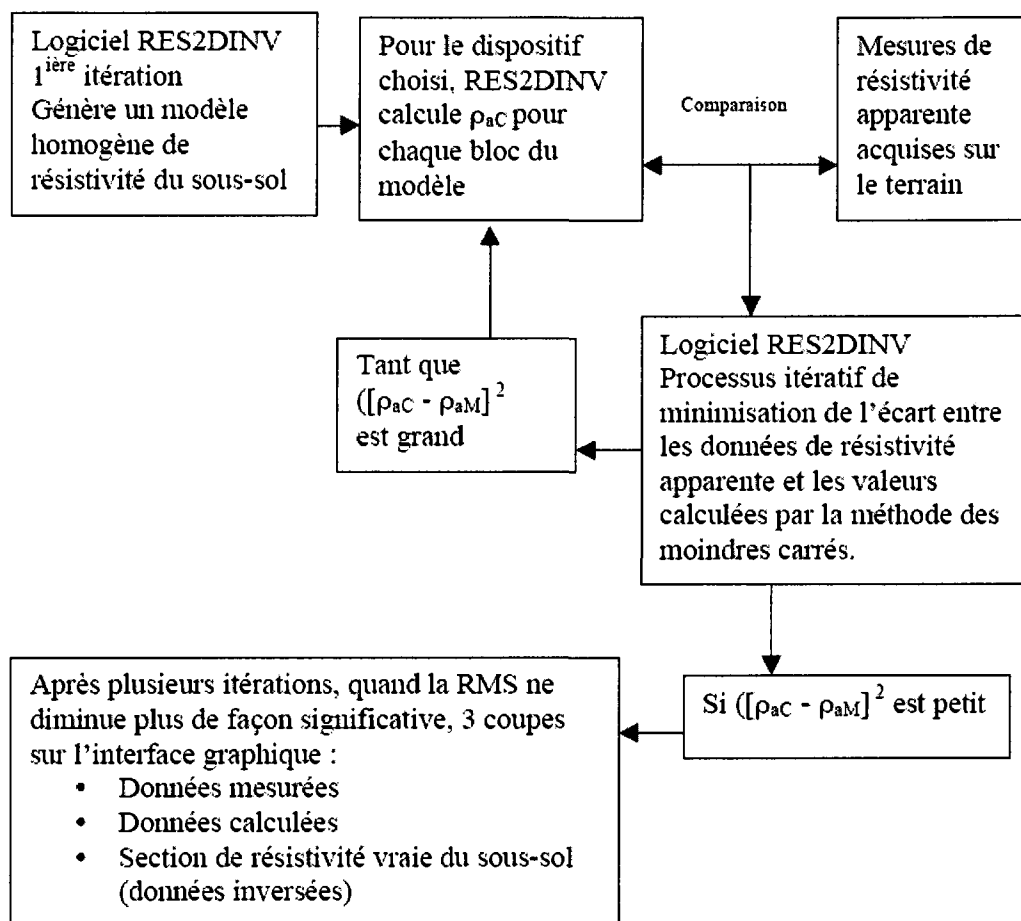


Figure 2.8 : Résumé des principales étapes de l'inversion à l'aide du logiciel RES2DINV (tiré d'Anterrieu, 2006)

2.2 Polarisation provoquée (PP)

2.2.1 Généralités

Le principe de base de cette méthode consiste à injecter un courant d'intensité I dans le sol à l'aide de deux électrodes (électrodes d'injection). Ce courant induit une différence de potentiel ΔV dans le sol suivant la loi d'Ohm. Ce potentiel est mesuré par une autre paire d'électrodes (électrodes de potentiel). Toutefois, le potentiel mesuré en surface ne s'établit pas instantanément et, d'une façon similaire, lorsque le

courant est coupé, le potentiel ne chute pas instantanément à zéro. C'est ce potentiel «résiduel» que l'on appelle «Polarisation Provoquée ou PP». Il existe un délai ou un retard entre l'instant où le voltage atteint son maximum et celui correspondant à un retour à l'équilibre (i.e., $V=0$). Ce retard provient soit des instruments de mesure, soit d'un effet du sous-sol. En général, le retard de nature instrumentale peut être corrigé. Le retard associé au sous-sol est souvent significatif et s'explique qualitativement par un effet capacitif, principalement électrochimique, du sous-sol. Cet effet capacitif (lié à la polarisation provoquée) traduit la capacité du matériau poreux à stocker des charges électriques lorsqu'il est soumis au passage d'un courant électrique (Chouteau et al, 2006).

Le passage du courant dans le sol ou la roche s'accompagne de processus électrochimiques, dont le caractère et l'intensité dépendent essentiellement des propriétés physiques et chimiques du sol. Une roche est formée par un agrégat complexe de particules dont la composition minéralogique et les propriétés physiques peuvent être différentes. De ce fait, on peut avoir dans une roche ;

- a) des particules métalliques, donc à conductibilité électronique ;
- b) des particules peu conductrices semblables à des diélectriques.

Entre ces diverses particules existent des pores, dont l'importance est en fonction de la porosité du milieu, du degré de saturation et du contenu ionique de l'eau d'imbibition. Ceci conduit à classer les processus électrochimiques qui peuvent se produire dans le sol, suite à une excitation électriques, en deux types (Chouteau et al, 2006) :

✓ **Potentiel d'électrodes** : Comprenant les phénomènes qui se produisent aux surfaces de séparation d'un milieu à conductibilité ionique avec un milieu à conductibilité électronique ;

✓ **Potentiel de membrane** : Comprenant les phénomènes qui se développent aux surfaces de séparation des conducteurs ioniques avec des matériaux diélectriques, ou au contact de conducteurs ioniques différents.

2.2.2 Étude de potentiel d'électrode

Le courant électrique dans le sol est généralement induit par le déplacement des ions de l'électrolyte contenu dans les pores de la formation investiguée. Cependant, la dissémination des particules métalliques dans la formation peut entraîner l'obstruction d'un certains nombre de pores. L'application d'une excitation électrique dans le sol (figure 2.9) entraîne la polarisation des particules. Ainsi, elles ne peuvent plus transmettre le courant électrique, ce qui engendre l'accumulation des ions à la surface de ces particules. Le champ électrique du dipôle C_1C_2 (figure 2.9) induit au niveau de la particule métallique des charges positives du côté C_1 et négatives du côté C_2 . Ces charges attirent à leurs tours des ions de signes opposés. On obtient en définitif autour de la particule métallique ce qu'on appelle une double couche électrisée et la particule est dite polarisée. Lorsqu'on coupe brutalement le courant électrique, la double couche se décharge en quelque dixième de seconde (Lasfargues, 1957). Cette décharge s'effectue dans le sens du courant appliqué se comportant comme un condensateur moléculaire. Ainsi, tous les pores bloqués deviennent polarisés et l'effet PP total (effet capacitif) va dépendre du nombre de pores obstrués (dissémination du minéral dans les pores). En général, le temps de retour du potentiel V_{P1P2} à l'état de l'équilibre dépend de nombreux facteurs tels que (Chouteau et al, 2006) :

- porosité ;
- degré de dissémination du minéral dans la formation ;
- conductivité du fluide interstitiel dans la formation ;
- conductivité intrinsèque des particules métalliques ;
- taille des pores.

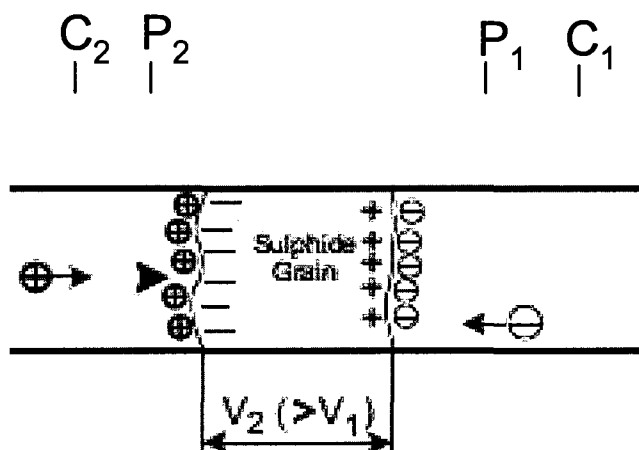


Figure 2.9: Illustration de l'effet PP dû à l'obstruction d'une conduite par une particule métallique (adapté de Chouteau et al., 2006)

2.2.3 Étude de potentiel de membrane

Ce phénomène résulte d'un contact d'une phase à conductibilité ionique avec une phase diélectrique ou au contact de deux phases à conductibilité ionique différente. Ce type de polarisation est souvent associé aux argiles (Telford et al., 1990). D'après les théories microscopiques, dans un système argile-électrolyte, la surface des minéraux va attirer les cations de l'électrolyte pour assurer l'équilibre électrique: une double couche électrique apparaît. Lorsqu'un courant est injecté à ce système, les charges positives vont facilement se propager dans le milieu alors que les charges négatives seront bloquées par la présence de cette double couche électrique constituée de cations. Cette distribution des charges va induire des zones à concentrations d'ions différentes. Lorsque le courant est coupé, les ions vont essayer de reprendre leurs positions initiales (processus de relaxation). La méthode de polarisation provoquée analyse le retard associé à ce processus de relaxation et donc la courbe de décroissance temporelle du potentiel après la coupure du courant.

Dans le cas de notre étude, c'est plutôt le phénomène de potentiel d'électrode qui domine par rapport au potentiel de membrane (en raison de l'absence d'argile). La mesure de l'effet PP (étude de la courbe de décharge du matériau) peut se faire soit dans le domaine temporel soit dans le domaine fréquentiel pour des fréquences inférieures à 10 kHz. Dans le premier cas, on parle de polarisation provoquée temporelle (PPT) (0.1s-10s) et dans le second cas, on parle de polarisation provoquée spectrale (PPS) (10 mHz-10 kHz). Dans ce rapport, nous détaillons seulement la polarisation provoquée temporelle puisque c'est le mode le plus utilisé et celui utilisé aussi pour l'investigation de la halde à stériles Petit Pas.

2.2.4 Mesure de l'effet PP dans le domaine temporel

Le phénomène PP dans le domaine temporel peut s'exprimer par le rapport de la tension mesurée pendant les temps morts en l'absence de courant sur la tension primaire mesurée lorsque le courant circule. Ce phénomène est une fonction des propriétés capacitives du matériau : on parle de «chargeabilité» M avec comme unité le millivolts/volt (mV/V) ou la milliseconde (ms).

Comme dans le cas de la résistivité, on utilise en général un dispositif dipôle-dipôle où l'émetteur injecte une onde de courant carrée d'une période donnée prédéfinie. L'excitation du courant appliqué permet d'engendrer une différence de potentiel V_0 (figure 2.10) qui est la somme de l'effet du courant et des effets PP. La résistivité est mesurée pendant l'injection du courant après un certain temps de début d'injection, V_{dly} (figure 2.10). Le potentiel V_s correspond au potentiel mesuré juste au moment de la coupure du courant. Comme en résistivité, la chargeabilité mesurée est une chargeabilité apparente qui est fonction des chargeabilités élémentaires des formations traversées par les lignes de courant. L'étude de la courbe de décharge après la coupure du courant permet de déterminer la chargeabilité apparente de chacune des fenêtres temporelles à l'aide de l'intégrale suivante (Reynolds, 1997) :

$$M_i = \frac{1}{V_0} \int_{t_i}^{t_{i+1}} V(t) dt \text{ (ms)} \quad (2.14)$$

On note également que pour pallier au problème d'induction électromagnétique des équipements de mesure (câbles), la mesure ne se fait qu'à partir d'un certain délai après la coupure (M_{dly}) (figure 2.10).

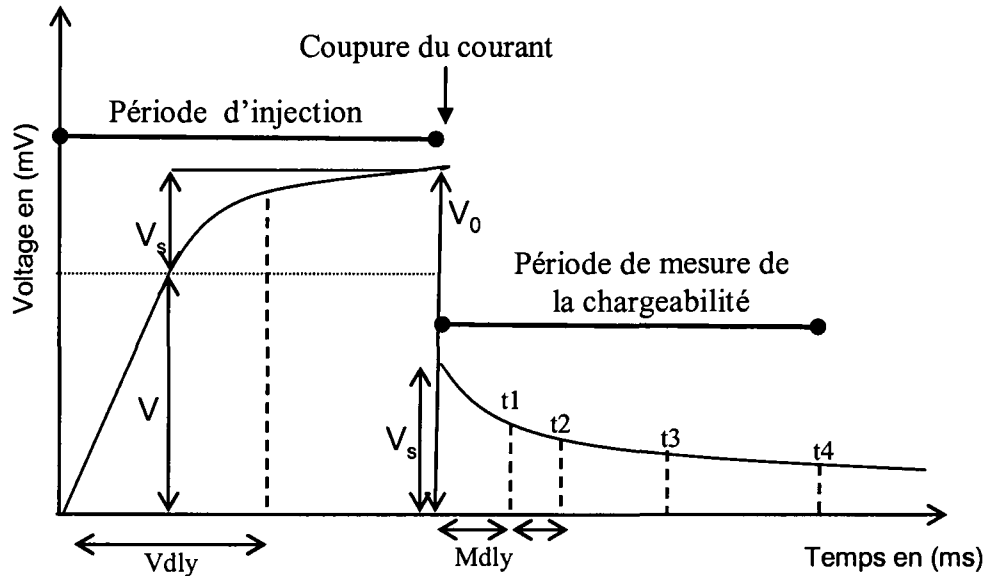


Figure 2.10 : Principe de mesure de la chargeabilité pendant la décharge après la coupure du courant injecté (adapté de Chouteau et al., 2006)

2.3 Méthodes transitoires

2.3.1 Principe de la méthode TDEM

La technique TDEM est une méthode électromagnétique de sondage géophysique. Elle permet d'investiguer le sous-sol à l'aide de l'induction électromagnétique produite par la coupure brutale d'un champ magnétique statique établi en surface. Ce champ magnétique est généré à l'aide d'une boucle de câble déployée à la surface où on fait circuler un courant électrique (figure 2.11a, en rouge). Le courant injecté est sous la forme d'une onde créneau (figure 2.11b). Des contraintes physiques,

instrumentales, font que la montée et la descente ne sont pas instantanées. On définit le temps de montée du signal à sa valeur nominal par le «Turn-on-time» et le temps qui met le courant pour s'annuler par le «Turn-off-time». Lorsque le champ magnétique primaire (courant injecté) est coupé brutalement, les courants de Foucault sont instantanément générés près du cadre de l'émetteur de manière à maintenir le champ magnétique partout dans le sol à la valeur qui existait avant la coupure (figure 2.11a, en bleu). Au fur et à mesure que ces boucles de courants diffusent en profondeur, leurs rayons augmentent avec le temps. L'image de diffusion des courants de Foucault peut être associée à des ronds de fumée (Nabighian, 1979).

La vitesse, la profondeur, ainsi que le rayon, caractérisent les filets de courant à un instant t et sont donnés par les relations suivantes (Nabighian, 1979) :

$$V = \frac{2}{\pi\mu\sigma t} \quad (2.15)$$

$$Z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{4t}{\sigma\mu}} \quad (2.16)$$

$$r = \sqrt{\frac{4.37t}{\sigma\mu}} \quad (2.17)$$

avec

σ : conductivité électrique (Siemens/m);

μ : perméabilité magnétique.

Ces boucles de courant créent à leurs tours un champ magnétique secondaire (suivant la loi d'Ampère) enregistré en surface soit à l'aide de la même boucle de câble (dispositif coïncident) soit à l'aide d'une boucle de câble plus petite placée au centre (figure 2.11 en bleu) ou à l'extérieur de la boucle d'émission (dispositif central ou dispositif avec offset). Le champ secondaire décroît dans le temps; plus le temps considéré est grand, plus l'information obtenue est profonde. L'étude de la forme de la décroissance du champ magnétique secondaire se traduit par une courbe de sondage

reliant l'amplitude du champ secondaire (ou de sa dérivée) (en ordonnée) au temps (en abscisse).

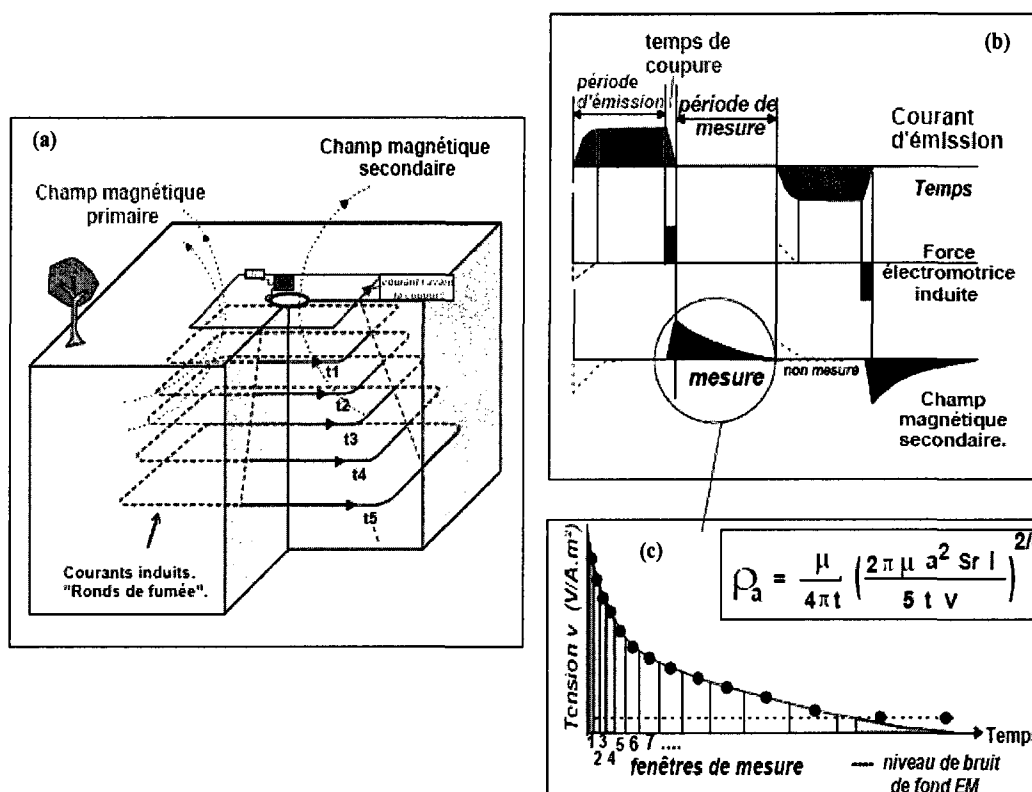


Figure 2.11: Principe de la méthode TDEM. (a) Schématisation de la diffusion des boucles de courant dans le sol après la coupure du courant injecté. (b) La forme de l'onde de courant injectée avec la force électromotrice générée dans le sol lors de la coupure du courant. (c) Illustration de l'échantillonnage du signal mesuré (adapté de McNeill, 1990)

La mesure de la décroissance du champ magnétique secondaire en fonction du temps est équivalente à la mesure de la résistivité en fonction de la profondeur. A cause du passage rapide des courants de Foucault à travers les milieux résistants, la méthode TDEM n'est pas sensible aux couches résistantes. Cependant, elle est très sensible aux terrains conducteurs et à la position de leurs interfaces supérieures (toits) et les définit de façon meilleure que les sondages électriques. En approximation temps tardif "Late

time", la relation entre la dérivée du champ magnétique secondaire, la résistivité (inverse de la conductivité) et le temps est donnée par la relation suivante (Fitterman et Stewart, 1986) :

$$\rho_{app} = \frac{\mu_0}{4\pi t} \left(\frac{2\pi \mu_0 a^2 S_a I}{5tV} \right)^{2/3} \quad (2.18)$$

avec

ρ_{app} : résistivité apparente des terrains traversés ($\Omega.m$);

a : coté de la boucle d'émission (m);

S_a : surface de la boucle de réception (m^2);

I : courant injecté (A);

V : voltage induit dans la boucle de réception (V);

σ : conductivité électrique (Siemens/m)

En sondage TDEM, on mesure la variation de la résistivité en fonction du temps. Dans le cas où le sous-sol est formé de couches de résistivités différentes, la résistivité mesurée est une résistivité apparente dont la valeur dépendra de la profondeur de pénétration des courants de Foucault au temps considéré.

2.3.2 Mesure et interprétation des données TDEM

La méthode TDEM est mise en œuvre en utilisant des dispositifs émetteur-récepteur placés à la surface du sol. Les deux configurations les plus utilisées sont :

- **Configuration centrale**

Cette configuration est la plus fréquemment utilisée en TDEM. La boucle de réception est placée au centre du cadre émetteur. Elle présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre sur le terrain, en plus de minimiser certains effets magnétiques (Descloîtres, 1998). Pour ce mode, le champ magnétique secondaire induit par les courants de conduction ne présente pas d'inversion de signe (il garde le même signe que le champ primaire).

▪ Configuration avec déport ("offset")

Pour cette configuration, le récepteur est placé à l'extérieur du cadre émetteur. Cette configuration est utilisée dans le cas des applications à faible profondeur, où la taille de la boucle d'émission est réduite, afin d'éviter la saturation du récepteur. Pour les applications plus profondes, les mesures avec déport du champ magnétique secondaire à l'extérieur des 4 côtés du cadre émetteur permettent d'évaluer si la structure du sous-sol est unidimensionnelle ou non (Descloitres, 1998). Cette configuration présente également l'avantage de minimiser certains effets de polarisation provoquée (effets de dispersion).

Les données consistent en une série de valeurs de voltage échantillonnées sur la réponse quelques instants après la coupure de courant (figure 2.11c). Les fenêtres sont localisées typiquement de quelques microsecondes à quelques dizaines de millisecondes de manière logarithmique sur l'axe du temps. Les premières fenêtres sont étroites car la variation est très rapide alors que les dernières sont plus larges puisque le signal commence à varier lentement avec une faible amplitude et un bruit plus important. Plusieurs fréquences de répétition du courant transmis sont habituellement utilisées (ex : 285, 75, 30 Hz) pour échantillonner diverses fenêtres de temps. Les mesures sont prises sur l'impulsion positive et sur l'impulsion négative, et intégrées sur un grand nombre de cycles (15 à 240 secondes) afin d'améliorer le rapport signal/bruit (Descloitres, 1998).

L'interprétation des sondages TDEM permet de déterminer la distribution de la résistivité du sous-sol en fonction de la profondeur. Cette interprétation se fait à l'aide de l'inversion 1D qui consiste à déterminer les paramètres du modèle en connaissant la réponse du sous-sol. La figure 2.12 montre un exemple d'inversion. Cette inversion est réalisée à l'aide de la méthode des moindres carrées en minimisant l'erreur entre la courbe observée (variation de la résistivité apparente en fonction du temps) et la réponse calculée pour un modèle de couche. Le programme cherche alors le modèle

de couches (épaisseur-résistivité) qui s'ajuste le mieux avec la courbe observée (de résistivité apparente en fonction du temps, équation 2.18). L'utilisateur peut fixer l'épaisseur ou la résistivité de certaines couches si elles sont connues. Un ajustement médiocre lors de l'inversion indique probablement la présence des variations latérales de conductivité ou d'autres effets perturbateurs.

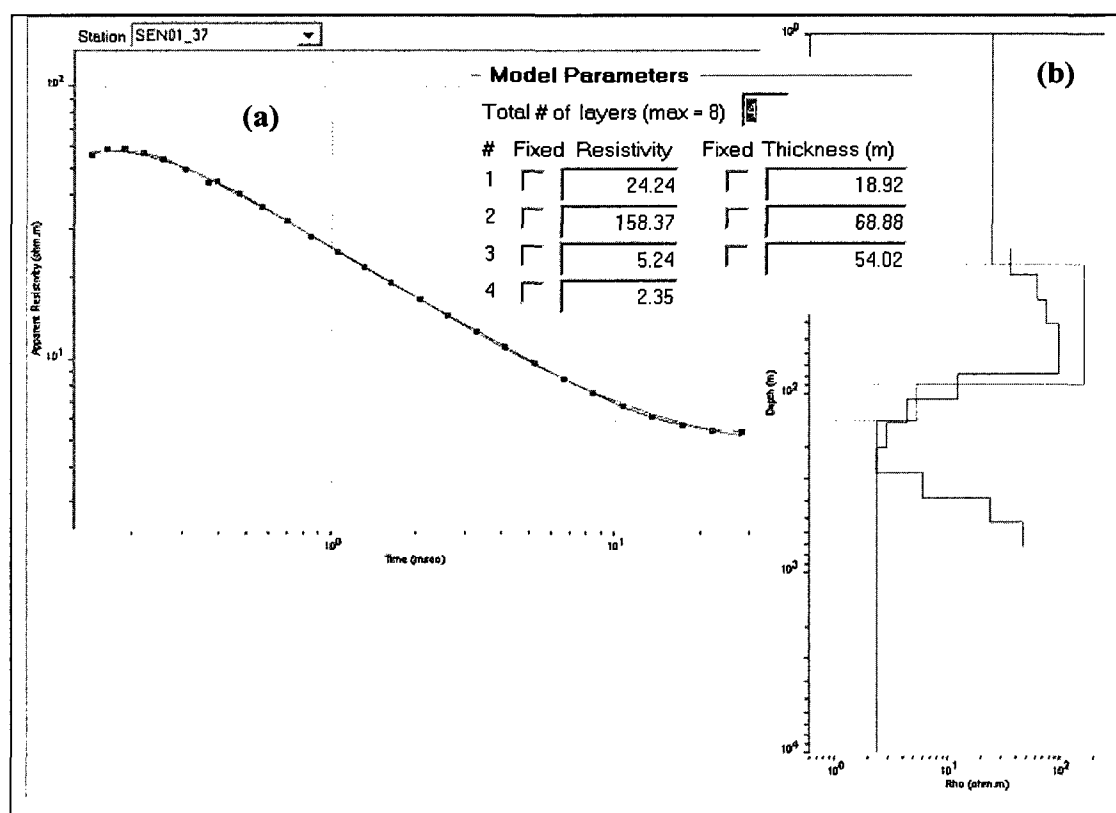


Figure 2.12: Exemple d'interprétation d'un sondage TDEM réalisé sur le bassin Sénégalais à l'aide du logiciel WinGLink. (a) points rouges indiquent la variation de la résistivité apparente en fonction du temps, la courbe verte indique la variation de la résistivité apparente en fonction du temps calculée par inversion des mesures (échelle log-log), (b) modèle de couche (épaisseur-résistivité) obtenu par inversion (tiré de Intissar, 2007)

La figure 2.12a montre un exemple d'interprétation d'un sondage transitoire (résistivité apparente en fonction du temps en échelle log-log). La courbe calculée

pour le modèle de couche montré en (b) s'ajuste bien avec la courbe observée. Ce modèle montre une chute de résistivité vers 90 m indiquant la détection du toit de la nappe phréatique du bassin Sénégalais.

2.3.3 Effets perturbateurs des sondages TDEM

▪ Effet de polarisation provoqué

La polarisation provoquée comme elle est décrite au paragraphe 2.2 pourrait être définie comme étant la faculté que possèdent certains matériaux à se polariser sous l'action d'un champ électrique puis se dépolariser lorsqu'on coupe brutalement ce champ. La cause principale des effets de polarisation provoquée et la présence des obstacles (obstruction) à la circulation du courant. Ces obstacles, qui se développent à l'interface entre l'eau minéralisée et les minéraux de la roche, dépendent aussi de la fréquence du champ électrique appliqué. La dissémination de la minéralisation dans un matériau développe des petits condensateurs isolés les uns des autres soit par l'eau ou par les grains résistants (Descloitres, 1998).

Lorsque les sondages transitoires sont réalisés sur un terrain polarisable, l'utilisation du modèle «Cole-Cole» qui prend en compte la variation de la conductivité en fonction de la fréquence est nécessaire afin de récupérer le modèle de terrain le plus juste possible. Le modèle Cole-Cole exprime la conductivité comme une fonction dispersive (variation avec la fréquence) (El Kaliouby et al, 1997) :

$$\sigma = \sigma_0 \frac{1 + (i\omega\tau)^c}{1 + (1-m)(i\omega\tau)^c} \quad (2.19)$$

avec

σ_0 : Conductivité en courant continu (fréquence très basse) (Siemens/m);

m : Chargeabilité Cole-Cole ($0 \leq m \leq 1$), elle est considéré comme la tension résiduelle qui serait mesurée immédiatement après la coupure brutale du courant injecté pour un temps infiniment long;

c : constante qui caractérise la dépendance en fréquence du phénomène PP. Ce paramètre contrôle la forme de la décroissance (en échelle log-log). Elle est physiquement reliée à la distribution de la taille des particules, pour une granulométrie étalée la constante c est de l'ordre de 0.1. Si au contraire la granulométrie est plus uniforme, c prend une valeur d'environ 0.6 (Descloîtres, 1998);

τ : constante de temps Cole-Cole. Ce paramètre détermine le taux de décroissance de la tension résiduelle. Il augmente avec la taille des particules responsable de l'effet PP. Cette croissance est proportionnelle au carrée de la taille des grains. En pratique, τ peut varier de quelques millisecondes à plusieurs centaines de secondes;

ω : fréquence angulaire (rad/s).

Effet de la viscosité magnétique

La viscosité magnétique est définie comme étant une dépendance fréquentielle de la susceptibilité magnétique, χ , que l'on peut écrire sous la forme suivante (Descloîtres, 1998) :

$$\chi = \chi' - i\chi'' \quad (2.20)$$

où χ' et χ'' représentent respectivement la susceptibilité magnétique en phase et en quadrature de phase et i et le nombre imaginaire tel que $i^2 = -1$.

Des travaux antérieurs ont montré que les distorsions, causées par la viscosité magnétique, affectant les mesures transitoires se manifestent essentiellement à la fin des courbes de sondage et varient comme t^{-1} à t^{-2} (Buselli, 1982 ; Lee, 1984a).

Descloîtres (1998) a effectué un ensemble de modélisations pour évaluer le comportement de l'effet magnétique, sur des mesures réalisées pour la prospection des aquifères, en fonction des paramètres d'acquisition. Il a conclu que la réponse purement magnétique se présente à la fin de la courbe transitoire lorsque les courants de conduction deviennent faibles. Dans ce cas, la pente de décroissance du signal est

fonction du temps d'injection; elle converge vers t^{-2} pour un temps d'injection court et vers t^{-1} lorsque ce temps est long. Lorsque l'effet de la conduction n'est plus négligeable en fin de la mesure transitoire (cas de la présence d'une couche conductrice en profondeur par exemple), cet effet peut relever l'amplitude de la courbe mesurée. Également, l'effet magnétique augmente lorsque la taille de la boucle devient faible.

En résumé, la réalisation des sondages avec différentes configurations (dispositif central, dispositif coïncident ou avec déport latéral) ainsi que l'utilisation des boucles d'émission de taille différentes contribuent à une interprétation plus pertinente des mesures transitoires. Également, la comparaison d'un modèle Cole-Cole avec différentes sortes de mesures comme les sondages électriques/PP permet de déterminer un modèle du terrain plus fiable.

2.4 Radar géologique

2.4.1 Généralités

Dans plusieurs environnements géologiques, le radar géologique ou (géoradar) donne des images de haute résolution des structures proche de la surface. Il est très économique et non destructif, tout en donnant de bonnes images de quelques centimètres à quelques mètres en fonction de la bande de fréquence utilisée et de la nature du sous-sol.

Le radar est une méthode électromagnétique : une antenne source émet des impulsions électromagnétiques EM dans la bande des radios fréquences. Comme l'onde sismique, cette impulsion peut se réfracter, se diffracter ou se réfléchir essentiellement aux changements des propriétés électriques à travers les milieux. L'onde réfléchie induit dans le récepteur un signal qui est enregistré en fonction du temps. Les paramètres d'acquisition dépendent du site et doivent réaliser un compromis acceptable entre la profondeur de pénétration et la résolution. Cette résolution dépend de la fréquence utilisée et des propriétés physiques de la subsurface. Les fréquences utilisées sont

dans la gamme de 20 MHz à 2 GHz, et la vitesse de propagation typique varie de 0,05 à 0,3 m/ns. On note aussi une décroissance de la vitesse avec l'augmentation de la permittivité diélectrique et l'atténuation des ondes avec l'augmentation de la conductivité électrique. L'amplitude du signal réfléchi est fortement liée au contraste de permittivité diélectrique entre les interfaces.

Dans le cas où le milieu de propagation est un bon diélectrique, l'approximation (dite de faible pertes) suivante peut être faite (Halleux, 1995) :

$$\left(\frac{\sigma}{\epsilon \omega} \right)^2 \ll 1 \quad (2.25)$$

et la vitesse des ondes radar (V), le facteur d'atténuation (α) et le facteur de phase (β) peuvent être simplifiés comme suit :

$$V = \frac{C}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} = \frac{0.3}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{m/ns}) \quad (2.26)$$

$$\alpha = \frac{1640 \sigma}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{dB/m}) \quad (2.27)$$

$$\beta = \frac{\omega}{V} \quad (\text{rad/m}) \quad (2.28)$$

avec :

σ : conductivité électrique effective du milieu à la fréquence utilisée

[Siemens/m];

ϵ : constante diélectrique du milieu;

α : atténuation [décibel /m];

ϵ_r : constante diélectrique relative à la fréquence utilisée ($\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$);

ϵ_0 : constante diélectrique du vide proche de celle de l'air;

μ_r : perméabilité magnétique relative ($\mu_r = \mu / \mu_0 \approx 1$ pour les matériaux non magnétiques, donc pour la plupart des formations géologiques);

ω : fréquence angulaire (rad/s).

L'amplitude et la vitesse de propagation des ondes EM sont fortement conditionnées par la permittivité diélectrique et la conductivité électrique des milieux traversés ainsi que la fréquence d'émission. D'autre part, plus le terrain sera conducteur, plus l'onde EM sera atténuée. Une faible fréquence induit une faible atténuation et l'onde EM va pénétrer plus en profondeur sans être affectée par les objets de dimension réduite mais dans ce cas la résolution sera faible.

Par ailleurs, à partir des mesures de la vitesse EM, il est possible d'estimer la teneur en eau volumique θ_w en fonction de la constante diélectrique ϵ_r via la relation suivante (Topp et al, 1980) :

$$\theta_w = -5.3.10^{-2} + (2.92.10^{-2} \times \epsilon_r) - (5.5.10^{-4} \times \epsilon_r^2) + (4.3.10^{-6} \times \epsilon_r^3) \quad (2.29)$$

D'autres relations ont aussi été développées au cours des dernières années selon le principe du TDR (Lesmes et al, 2005; Annan, 2005).

2.4.2 Principes d'utilisation du georadar

Une antenne émettrice envoie dans le milieu des impulsions d'une durée très courte, à des fréquences variant de 20 MHz à 2 GHz, en fonction de l'antenne utilisée. Ces impulsions génèrent un front d'onde EM qui se propage à travers le milieu investigué. Lorsque le front d'onde rencontre un contact entre deux milieux présentant des propriétés diélectriques différentes (contact entre deux couches, cavité, objets enterrés, fractures, etc.) une partie de son énergie est réfléchiée, tandis que l'autre pénètre plus profondément. Les ondes réfléchies sont captées en surface par l'antenne réceptrice.

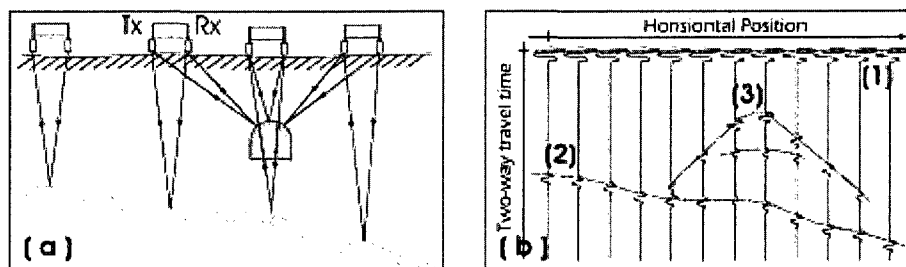


Figure 2.13: (a)-représentation du principe de l'utilisation du GPR (b)- les types d'ondes : (1) onde directe propagent dans l'air, (2) onde réfléchie le long de l'interface (3) onde diffractée par l'objet à taille réduite (tiré de Annan, 2001)

Un exemple d'acquisition 2D est schématisé sur la figure 2.13. Le système radar, représenté par 2 antennes (Tx : émettrice et Rx : réceptrice), est utilisé sur la surface le long d'un profil horizontal (figure 2.13.a). Les fronts d'ondes subverticaux vont soit se réfléchir sur une interface qui limite des milieux électromagnétiquement différents, soit être diffractés par des objets de petite taille par rapport à la longueur d'onde du signal incident. La figure 2.13.b montre l'enregistrement des temps de propagation des ondes EM (traces radar) en fonction de la position du dispositif radar. On observe une onde (onde 1) qui apparaît sur l'ensemble des traces à un temps identique proche de 0. Il s'agit de l'onde directe qui se propage dans l'air ou dans le sol directement entre les deux antennes. On observe également des ondes réfléchies le long de l'interface formant un réflecteur continu (onde 2) ainsi qu'une hyperbole de diffraction (onde 3) centrée sur l'objet diffractant formé par une cavité.

Chapitre 3 : Mise en contexte et études antérieures

3.1 Introduction

La présente étude a été réalisée dans le cadre d'un travail plus global mené par la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en Environnement et gestion des rejets miniers. Elle s'intéresse à la caractérisation hydrogéophysique des haldes à stériles. De façon plus spécifique, l'étude a été menée sur la halde Petit Pas, située sur le site de la mine Tio, propriété de QIT-Fer et Titane, filiale du groupe Rio Tinto. La mine Tio est située sur la Côte Nord à environ 43 km au nord-est de la ville Havre Saint Pierre, Québec, Canada (figure 3.1).

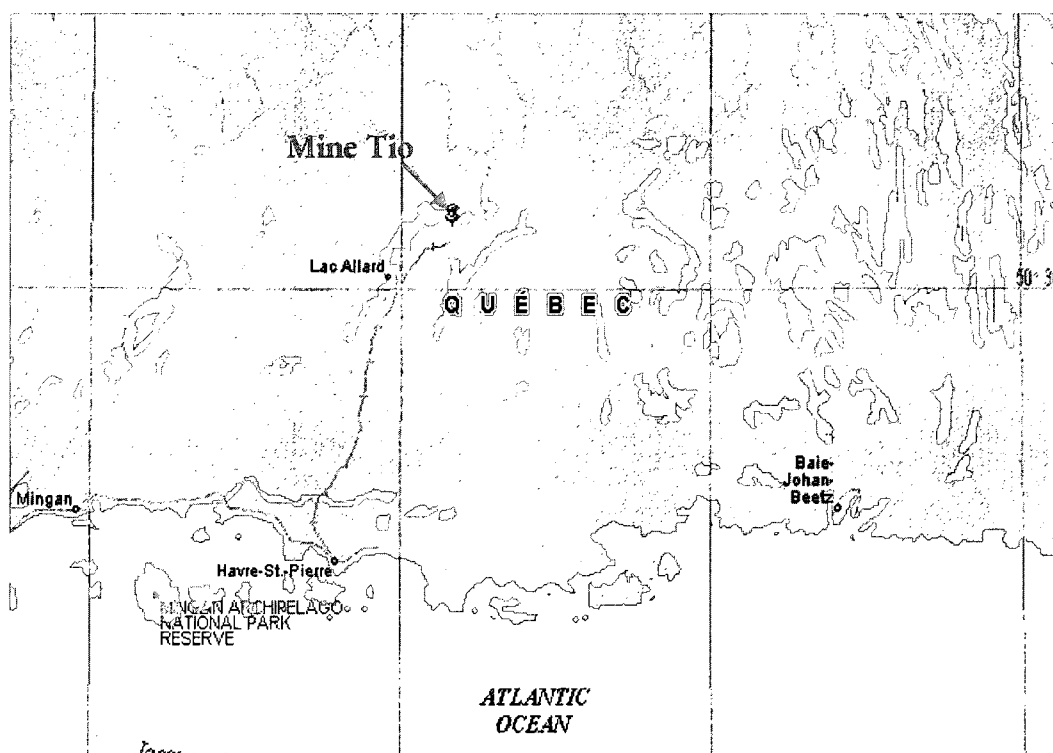


Figure 3.1 : Site de la mine Tio sur la Côte Nord (tirée du rapport d'étude d'Abitibi Géophysique (# 05N853, 2005)

La mine Tio, exploitée par deux fosses à ciel ouvert, est considérée comme le plus grand gisement d'ilménite massif au monde. Ce gisement, qui offre un potentiel

énorme, est en exploitation depuis 1950 et il garde des perspectives d'avenir pour au moins un demi-siècle. Le minerai est extrait par forage et sautage, avec une moyenne de 100 000 à 200 000 tonnes de minerai et de stériles par sautage. Après la libération, le minerai est transporté vers des concasseurs où sa taille est réduite à moins de 7,5 cm. Par la suite, le minerai concassé est transporté par train à destination de Havre Saint-Pierre, où il est réacheminé par bateau vers le complexe métallurgique de traitement à Sorel-Tracy (près de Montréal).

Le minerai d'ilménite est extrait d'une anorthosite, une roche composée de feldspaths plagioclases. Une partie de la roche stérile a été transportée et déposée dans un lac au nord, formant une halde d'une surface de l'ordre de 92 hectares et d'une hauteur pouvant atteindre 120 m (figure 3.2).



Figure 3.2: Photo aérienne d'une partie de la mine Tio, y compris la halde Petit-Pas

Les haldes à stériles sont quelques fois la source d'une eau de drainage minier acide (DMA) associée à la présence des sulfures métalliques. Les eaux de DMA sont usuellement caractérisées par un faible pH, un taux d'acidité élevé, ainsi qu'une concentration élevée en sulfates et en métaux lourds. Cependant, de nombreux métaux tel que le nickel, le zinc, le cobalt et l'arsenic, sont également solubles à pH proche de la neutralité et peuvent ainsi constituer une source de contamination des effluents sans la présence des conditions acides. Ce phénomène est appelé le drainage neutre contaminé (DNC) (Bussière et al, 2008). La halde Petit Pas de la mine Tio fait face à ce problème. Le minerai extrait de la mine est composé principalement d'oxyde d'hémo-ilménite (80 à 98%) et de plagioclases (0,5 à 15%) (Plante et al, 2008). Les stériles ont une composition minéralogique variable. Par exemple, on trouve des endroits où le pourcentage de l'hémo-ilménite dépasse 60% avec seulement 15% d'anorthosite et d'autres avec seulement 27% d'hémo-ilménite et 43% d'anorthosite. On présente dans le chapitre 5 les résultats de deux analyses minéralogiques réalisées sur des stériles prises à deux endroits différents (Pepin, 2009).

3.2 Étude antérieures

Afin de comprendre comment le nickel est libéré dans les effluents de la halde, la mine a entrepris de nombreuses études en laboratoire et sur le terrain. Ces études incluent trois forages dans les stériles afin d'étudier la structure interne et les fondations. Ce travail n'a pas apporté toute l'information désirée, car le taux de récupération des échantillons était particulièrement faible (Chouteau et al, 2005). La halde est immense et l'historique de sa construction est peu connu. Pour cette raison, la mine a opté pour une caractérisation géophysique de la halde. Une première campagne de géophysique a été conduite par la compagnie Abitibi Géophysique de Val d'Or (2005), et l'interprétation des données a été octroyée au Laboratoire de Géophysique de l'École Polytechnique de Montréal. Les méthodes géophysiques ont été sélectionnées selon les objectifs définis ainsi que le potentiel de chaque méthode. Ainsi, la méthode de tomographie électrique/chargeabilité a été choisie pour l'étude

de la structure interne et la détection des zones conductrices souvent associées aux endroits de teneur en eau élevée et avec plus de solides dissous. La chargeabilité est utilisée afin de renseigner sur la minéralisation et sa dissémination à travers la halde. Des méthodes électromagnétiques transitoires, qui permettent l'obtention de la distribution de la résistivité sur de grandes profondeurs avec plus de résolution, ont également été appliquées. La figure 3.3 montre le plan des profils électriques/PP et TDEM réalisés au niveau de la halde.



Figure 3.3: Localisation des profils électriques/PP et TEM réalisés en 2005

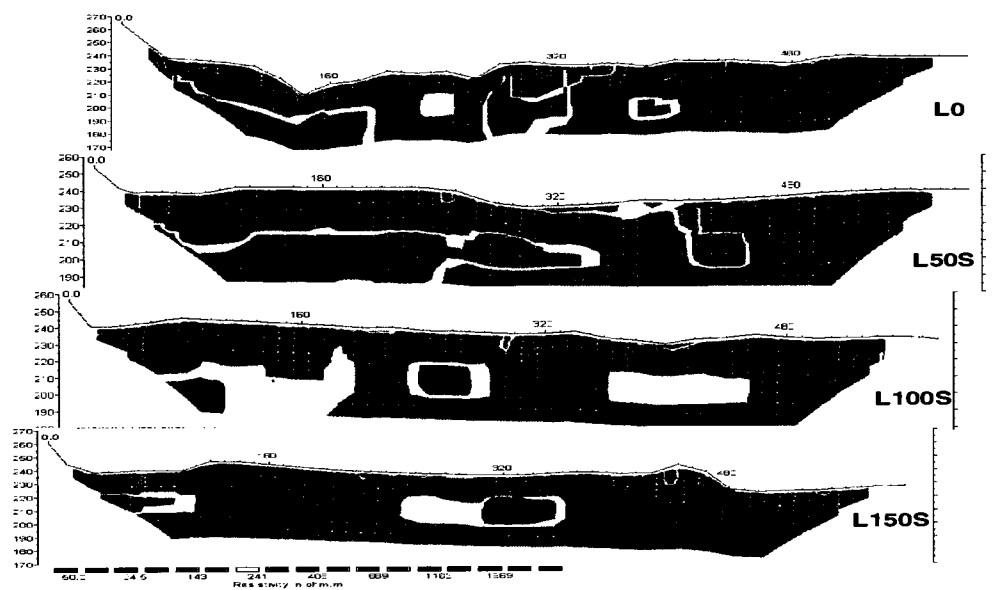


Figure 3.4 : Exemple de profils électriques réalisés en 2005 (adapté du rapport LGAP 2005, Chouteau et al, 2005)



Figure 3.5 : Exemple de profils de chargeabilité réalisés en 2005 (adapté du rapport LGAP 2005, Chouteau et al, 2005)

Les données de résistivité/PP ont été acquises à l'aide du dispositif dipôle-dipôle avec un espacement unitaire (a) entre électrodes de 20 m et des distances dipôle émetteur-dipôle récepteur n.a avec n variant de 1 à 10 en fonction des conditions d'accès au niveau de la surface de la halde. La profondeur d'investigation dépend de la longueur des profils; elle est de l'ordre de 30 à 35 m pour les profils les plus courts et elle atteint 55 m pour les profils les plus longs. Les profils électriques ont montré qu'en surface de la halde (20 premiers mètres), les stériles sont plus résistifs (600 à 2000 $\Omega.m$) (figure 3.4). En dessous de cette partie résistive, on trouve une couche conductrice (100 $\Omega.m$) qui s'étend jusqu' à une profondeur d'environ 50 m. Cette couche conductrice peut être expliquée soit par une granulométrie plus fines (retenant plus d'eau que les autres couches) ou à un pourcentage de particules métalliques plus important (par rapport aux autres époques de construction) ou les deux phénomènes ensembles. En dessous de la couche conductrice, on trouve de nouveau une couche plus résistante lorsque la distance émetteur-récepteur est assez grande pour la détecter. Les levés de la chargeabilité (figure 3.5) montrent que la chargeabilité est assez uniforme et plutôt élevée (50 à 250 ms) sur l'ensemble des profils (Chouteau et al, 20005). Pour que des valeurs assez élevées puissent être mesurées en chargeabilité, il faut une concentration importante de particules métalliques distribuée au sein des stériles ainsi qu'un électrolyte générant l'effet PP au contact avec les grains métalliques. Cependant, on note l'absence de corrélation entre les données de chargeabilité et de résistivité. À cet égard, il semble que la résistivité est plus diagnostique que la chargeabilité pour l'étude de la structure interne de la halde puisqu'elle a permis de déceler plus d'entités géoélectriques que la chargeabilité.

Des sondages transitoires ont aussi été effectués à l'aide d'un transmetteur TEM-57 MK II et d'un récepteur numérique Protom 67D (les deux sont des produits de Geonics Limited). La configuration utilisée est celle d'une boucle (carrée) centrale de 50 m de côté. Le taux de répétition utilisé a été de 30 Hz. La dérivée partielle du champ magnétique secondaire, B , $\frac{\partial B}{\partial t}$ pour les composantes verticales Z et

horizontales X, Y est mesurée sur 30 fenêtres de temps espacées géométriquement de $5 \cdot 10^{-3}$ millisecondes à 7 millisecondes. La période de temps séparant la coupure complète de courant au début des mesures ("turn off time") est d'environ $1000 \mu\text{S}$. Malheureusement, les résultats de ces sondages s'avèrent non utilisables puisque le champ secondaire mesuré est très faible et quasi incohérent (Figure 3.6). Ceci proviendrait d'un problème de manipulation lors des mesures; l'enregistrement a commencé trop tardivement (le "turn off time" est plus long que la normale).

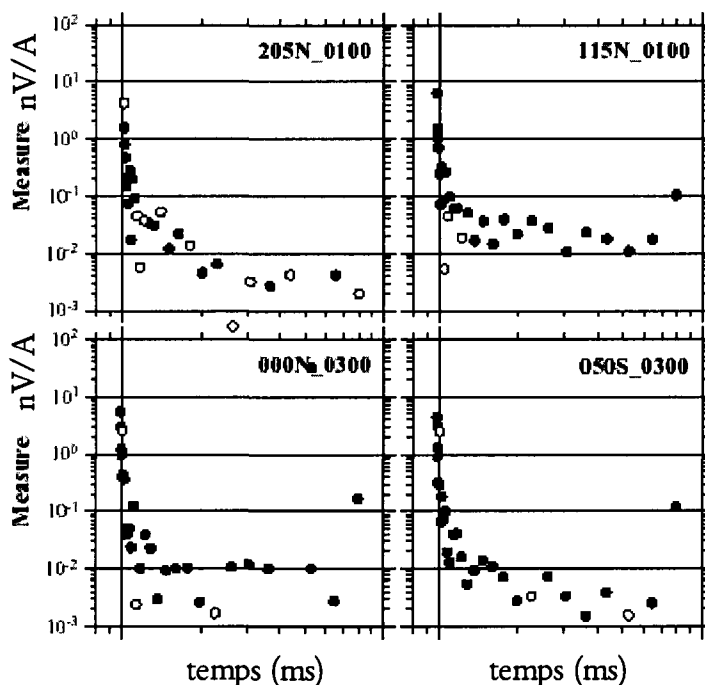


Figure 3.6 : Exemple de sondage TDEM; les points noirs correspondent aux valeurs négatives, les cercles blancs aux valeurs positives, les deux axes sont en échelle logarithmique (adapté du rapport LGAP 2005-04, Chouteau et al, 2005)

Par ailleurs, en parallèle avec l'étude de caractérisation géophysique et hydrogéologique réalisées par l'École Polytechnique de Montréal, d'autres études de caractérisation géochimique se sont déroulées sous la responsabilité de l'UQAT

(Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue). Mentionnons notamment les travaux de Geneviève Pepin (étudiante en maîtrise) et de Benoît Plante (étudiant au doctorat). Parmi les travaux réalisés dans ce cadre, on note l'installation de 7 cellules expérimentales sur la halde Petit Pas pour le suivi de paramètres géochimiques des effluents tel que le pH, le potentiel d'oxydoréduction, la conductivité électrique, la température ainsi que la concentration du nickel. Chaque cellule contienne environ 30 m³ de stériles (les particules de plus de 50 cm de diamètre ont été retirées). Le tableau 3.1 montre certaines caractéristiques des cellules.

Tableau 3.1 : Caractéristiques principales des stériles dans chaque cellule expérimentale (adapté de Pepin, 2009)

	Cellule 1	Cellule 2	Cellule 3	Cellule 4	Cellule 5	Cellule 6	Cellule 7
% en Ilménite	20%	45%	60%	20%	40%	60%	60%
Age des stériles	1 mois	1 mois	1 mois	25 ans	25 ans	25 ans	1 mois

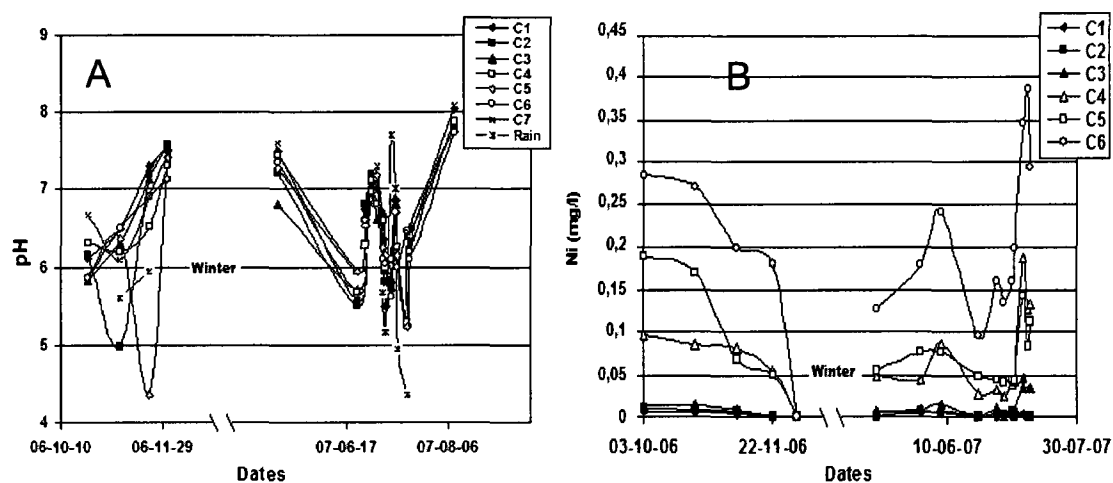


Figure 3.7 : A) Variation du pH en fonction du temps dans les sept cellules, B) variation de la concentration du nickel dans les conditions naturelles de surface (adapté de Pepin et al, 2008)

Le suivi des paramètres en octobre et novembre 2006 ainsi que durant l'été 2007 a montré que le pH du lixiviat est fortement contrôlé par la qualité d'eau de pluie, figure 3.7a (Pepin et al, 2008). La concentration du soufre est basse dans toutes les cellules. On note également que les cellules contenant des stériles de 25 ans (stériles plus altérés) libèrent plus de nickel que les cellules avec des stériles plus récents (figure 3.7b).

Des mesures des propriétés physiques et hydriques ont été réalisées par Denis Deschartes durant son stage d'été en 2007. Ainsi, la densité du matériau sec mesurée in situ varie de 2400 à 2900 kg/m³. Des essais d'infiltration ont également été réalisés à différents endroits de la halde. Ils ont montré des valeurs de vitesse d'infiltration qui varient entre 10¹ à 10⁻⁴ cm/s.

Chapitre 4 : Mesure des propriétés hydriques des stériles au laboratoire

4.1 Introduction

La structure interne des haldes à stériles, résultant essentiellement du mode de construction et de la granulométrie des matériaux, a une influence significative sur les déplacements de l'eau et de l'air à l'intérieur des roches stériles. Le taux d'infiltration de l'eau à la surface de la halde (l'eau provenant des précipitations, de la fonte des neiges, du ruissellement) est généralement plus bas à long terme que le taux nécessaire pour la saturation de la halde. Par conséquent, à l'intérieur des haldes, ce sont les lois en milieu non saturé qui régissent l'écoulement de l'eau et de l'air. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des mesures des propriétés hydriques effectuées sur les stériles issus de la halde Petit Pas. L'étude de ces propriétés est essentielle pour comprendre le comportement de la halde Petit Pas vis-à-vis de l'écoulement de l'eau et du gaz. Les paramètres étudiés sont nombreux. Ils incluent l'analyse granulométrique, la densité relative, la conductivité hydraulique à saturation, l'étude des écoulements préférentiels ainsi que la courbe de rétention d'eau. Le matériel étudié a été reçu en 2007 au laboratoire de la Chaire industrielle sur l'environnement et gestion des rejets miniers en provenance de la mine Tio de QIT-Rio Tinto en deux barils (d'une masse d'environ 500 kg pour chacun).

4.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages respectifs des différentes familles de grains constituant un échantillon de sol. Celle-ci est réalisée en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres et dont la dimension des ouvertures est décroissante du haut vers le bas (la norme ASTM D422).

Les données concernant la granulométrie complète des stériles sont rarement disponibles et ce en raison de la logistique complexe pour une telle analyse. En effet, mis à part l'hétérogénéité de la granulométrie liée au mode de mise en place, la granulométrie des roches stériles peut s'étaler de la taille d'une particule d'argile à celle d'un bloc de plus d'un mètre de diamètre. Dans notre cas, nous avons fait l'analyse du matériel reçu à l'aide d'un tamiseur comprenant 7 tailles; les résultats sont donnés au tableau 4.1. Les particules dont le diamètre est inférieur à 10 mm ont une teneur en eau massique significative, de l'ordre de 3%, et de ce fait une correction des masses a été apportée.

Tableau 4.1 : Résultats de la séparation granulométrique d'un échantillon de stériles de QIT (reçu au baril)

Diamètre D (mm)	Masse humide en (kg)	Masse d'eau estimée en (kg)	Masse sol sec en (kg)	Fraction de la masse totale (%)	Teneur en eau massique $w=M_w/M_s$ (%)
$D \leq 4,75$	210,15	6,20	203,95	41,65	3,04
$4,75 \leq D \leq 10$	92,88	2,74	90,14	18,41	3,04
$10 \leq D \leq 14$	32,20	sec	32,20	6,58	0
$14 \leq D \leq 19$	29,57	sec	29,57	6,04	0
$19 \leq D \leq 25$	30,11	sec	30,11	6,15	0
$25 \leq D \leq 37,5$	54,42	sec	54,42	11,11	0
$37,5 \leq D$	49,25	sec	49,25	10,06	0

L'analyse de la granulométrie des particules inférieures à 4,75 mm se fait en deux étapes. D'abord, on détermine la granulométrie des particules dont le diamètre est situé entre 4,75 mm et 80 μm par tamisage. Pour les particules plus fines (passant 2 mm, tamis10), nous utilisons la sédimentométrie, norme ASTM D 422 (2000a).

Afin d'analyser un échantillon représentatif de la tranche des particules dont le diamètre est situé entre 4,75 mm et 80 μm , nous avons bien mélangé une masse d'environ 40 kg du passant 4,75. À l'aide d'un instrument de quartage, nous continuons de séparer l'échantillon jusqu'à ce qu'on obtient une masse d'environ 500 g. Pour la sédimentométrie, nous utilisons un échantillon représentatif du passant 4,75 d'une masse d'environ 50 g. Ensuite, nous ajoutons 125 mL d'une solution d'hexaméosphate de sodium. Cette solution a pour but de mettre en suspension les particules de l'échantillon. La suite de la méthode de sédimentométrie est décrite en détail dans l'annexe 4.1. La figure 4.1 montre le résultat de l'analyse granulométrique.

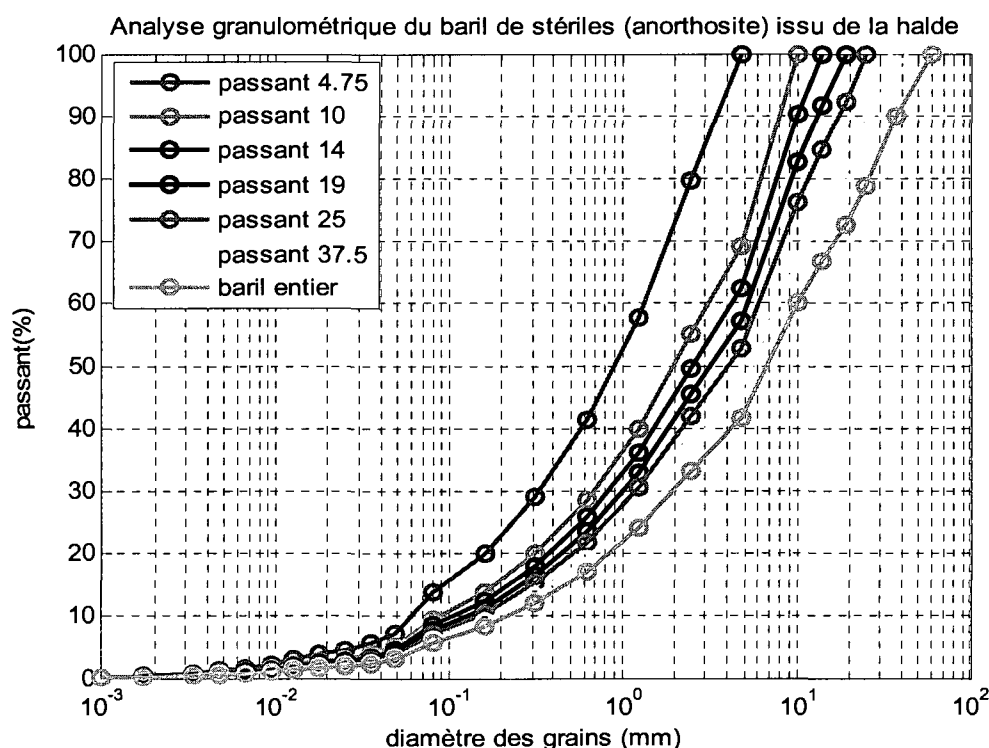


Figure 4.1 : Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie

L'analyse de la courbe granulométrique montre que les stériles reçus présentent une granulométrie assez étalée bien que l'échantillon analysé soit déjà tronqué puisqu'il est extrêmement compliqué de transporter des blocs métriques au laboratoire. Cette analyse permet également de déterminer divers paramètres tels que le coefficient d'uniformité (C_U) et le coefficient de courbure (C_C). Ces paramètres sont calculés à l'aide des diamètres effectifs D_{10} , D_{60} et D_{30} . Ainsi le D_{10} correspond au diamètre pour lequel 10% des particules sont plus fines et 90% plus grossières. La même définition s'applique pour D_{60} et D_{30} . Le coefficient C_U ($C_U = D_{60}/D_{10}$) renseigne sur l'étendue ou l'étalement des grosseurs des grains (Bowles, 1984; McCarthy, 2002). Ainsi, pour des valeurs faibles de C_U , l'échantillon est plus uniforme tandis que pour les valeurs élevées l'échantillon est dit étalé. Le coefficient de courbure, C_C ($((D_{30})^2/(D_{10}.D_{60}))$) renseigne sur l'allure de la courbe entre D_{10} et D_{60} .

Dans le cas de l'échantillon étudié (baril entier) on a $D_{10}=0.2$ mm, $D_{30}=2$ mm et $D_{60}=10$ mm. Ceci donne une valeur de coefficient d'uniformité, C_U , de l'ordre de 50 et de courbure, C_C , de l'ordre de 2. Ces valeurs montrent que la granulométrie de l'échantillon étudié est assez étalée. Les paramètres granulométriques de l'ensemble des courbes sont donnés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Paramètres caractérisant les courbes granulométriques de la figure 4.1

Passant	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_U	C_C	$D_r (\rho_s/\rho_w)$
4,75	0,05	0,30	1,17	23,4	1,54	3,698
10	0,08	0,70	3,1	38,8	1,98	3,698
14	0,11	0,85	4,2	38,2	1,56	3,698
19	0,12	1,00	5,1	42,5	1,63	3,698
25	0,15	1,20	6,0	40,0	1,60	3,698
37,5	0,20	1,60	8,0	40,0	1,60	3,698
baril entier	0,22	2,00	10,0	45,5	1,82	3,698

4.3 Détermination de la densité relative

La densité relative des grains est déterminée par la méthode du pycnomètre. Les grains utilisés doivent passer le tamis 5 mm selon la norme ASTM C 128. Théoriquement, la masse volumique des grains est déduite du rapport suivant : $\rho = m/V$, avec ρ , m et V représentant respectivement la masse volumique, la masse et le volume des grains. En pratique, il est possible de mesurer la masse sur la balance, mais il peut être difficile de déterminer le volume avec exactitude. Cependant, à l'aide de la méthode du pycnomètre nous pouvons déterminer le volume avec une bonne précision. Tout d'abord, il s'agit de remplir un pycnomètre avec une certaine masse de matériau et d'eau bien désaérée, pour empêcher l'air d'occuper un certain volume dans notre échantillon. Pour un même volume total, le rapport entre la masse du pycnomètre rempli de sol et d'eau et sa masse avec de l'eau seulement (qui varie en fonction de la température) permet de calculer la densité relative à partir de laquelle nous pouvons calculer la masse volumique.

La densité relative est déduite par la formule 4.1 :

$$D_r = \frac{M_s}{M_s - M_{(p+e+s)} + M_{(p+e)}} \quad (4.1)$$

Avec

M_s : Masse du sol sec;

$M_{(p+e)}$; Masse de l'ensemble pycnomètre et eau;

$M_{(p+e+s)}$; Masse de l'ensemble pycnomètre, eau et matériau (stériles).

Trois essais au pycnomètre ont été réalisés sur 3 échantillons distincts pour obtenir la densité relative des grains. Les trois tests ont permis d'obtenir les résultats suivants : 3,715, 3,688 et 3,690. Dans la suite des calculs, la densité relative des grains est considérée égale à la moyenne de ces trois valeurs, c'est-à-dire $D_r = 3,698$.

4.4 Étude de la conductivité hydraulique à saturation

4.4.1 Mesures au laboratoire de k_{sat} (Colonne à paroi rigide)

La conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) est la capacité d'un sol à transmettre un volume d'eau au cours d'un temps donné et pour une section établie selon la direction du flux. Elle se mesure au laboratoire à l'aide de la méthode à charge constante ou variable en se basant sur la loi de Darcy. La méthode à charge constante consiste à garder le même gradient hydraulique durant tout l'essai et à noter le volume d'eau recueilli, V , pendant un certain temps, t . Pour sa part, la méthode à charge variable débute avec un certain gradient hydraulique qui diminue en fonction du temps jusqu'au point où il peut s'annuler. Les paramètres à noter durant cet essai sont respectivement, les charges au niveau de la burette d'entrée et de sortie ainsi que le temps écoulé entre les lectures. Les formules de calcul de k_{sat} pour un essai à charge constante ou variable dans le cas d'un échantillon de section S et de hauteur L sont données respectivement par les équations 4.2 et 4.3, (Freeze et Cherry, 1979).

$$\text{Charge constante : } k_{sat} = \frac{VL}{Ath} \quad (4.2)$$

avec :

k_{sat} : Conductivité hydraulique saturée (cm/s) ;

h : Différence de charge hydraulique entre les deux piézomètres de mesure (cm) ;

V : Volume d'eau écoulé (cm³) ;

t : Temps écoulé (s) pour recueillir le volume d'eau (s) ;

L : Longueur de l'échantillon (cm) ;

A : Aire de la section de l'échantillon (cm²).

$$\text{Charge variable : } k_{sat} = \frac{(s_1 s_2)L}{At(s_1 + s_2)} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (4.3)$$

avec :

s_1, s_2 : Respectivement, aire de la section d'entrée et de sortie d'eau (diamètre burette entrée, et sortie) (cm^2) ;

t : Temps écoulé entre les mesures des deux charges hydrauliques (s) ;

L : Longueur de l'échantillon (cm) ;

h_1, h_2 : Charge hydraulique aux temps respectifs t_1 et t_2 (cm) ;

A : Aire de la section de l'échantillon (cm^2).

▪ Montage des colonnes

En raison de la taille assez importante des stériles étudiés, nous avons utilisé des colonnes cylindriques de 30 cm de diamètre et 100 cm de hauteur. Les étapes de montage des colonnes respectent certaines normes et nécessitent le suivi d'un protocole bien précis afin d'obtenir des résultats crédibles.

Il s'agit tout d'abord de préparer les pourcentages en masse de chaque tranche suivant la courbe granulométrique du passant considéré. Le sol est ensuite humidifié et bien mélangé à l'aide d'une pelle pour assurer l'uniformité. L'état de la colonne est vérifié pour l'absence de fuite. Les piézomètres sont protégés par un coton afin d'éviter le blocage.

Le montage de la colonne se fait par couche d'environ 5 cm d'épaisseur où chaque couche est compactée avant d'ajouter la suivante. Afin d'éviter l'écoulement préférentiel de l'eau, nous avons mis une couche de graisse sur la paroi à chaque niveau. Trois capteurs de pression en céramique saturés sont placés avec attention (très fragiles) en bas, au centre et en haut de la colonne. Ces derniers mesurent la pression d'eau durant les essais. Aux deux extrémités de la colonne, nous avons placé un géotextile afin d'empêcher les particules de se drainer avec l'eau à la sortie. Malgré cette précaution, l'eau à la sortie a montré parfois la présence des particules fines. Les entrées et sorties d'eau et d'air sont assurées par des valves placées sur les plaques des extrémités (Hernandez, 2007).

Après le montage, le matériel est laissé au repos pour une durée d'environ 2 jours avant le début de la saturation. Il est à noter qu'il faut prendre des précautions au

cours de la manipulation pour éviter toute fissure dans le système car la réparation des colonnes est difficile après le montage. La saturation de la colonne se fait du bas vers le haut en appliquant un écoulement induit de faible débit et sans appliquer un vide pour éviter la migration des particules fines. Le protocole de montage et démontage des colonnes est détaillé dans l'annexe 4.2 (Hernandez, 2007 ; Gaillot, 2007).

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons les résultats relatifs aux essais effectués sur quatre granulométries; soit deux colonnes avec le passant 10 mm (avec et sans système d'électrodes) et le passant 19 mm d'anorthosite ainsi que la colonne passant 10 mm d'ilménite. Les matériaux utilisés dans les colonnes passant 19 mm d'anorthosite et passant 10 mm d'ilménite ont été déjà utilisés pour des mesures hydriques auparavant, et leur granulométrie avant le montage est montrée à la figure 4.2. Le tableau 4.3 montre un résumé des propriétés de base des matériaux dans les colonnes montées. Le tableau 4.4 montre les données au montage de la colonne passant 10 mm avec le système des électrodes. Les données de montage correspondant aux autres colonnes sont données sur le CD joint au mémoire. Les mesures de k_{sat} à charges constante et variable seront fournies après une présentation des méthodes de prédiction.

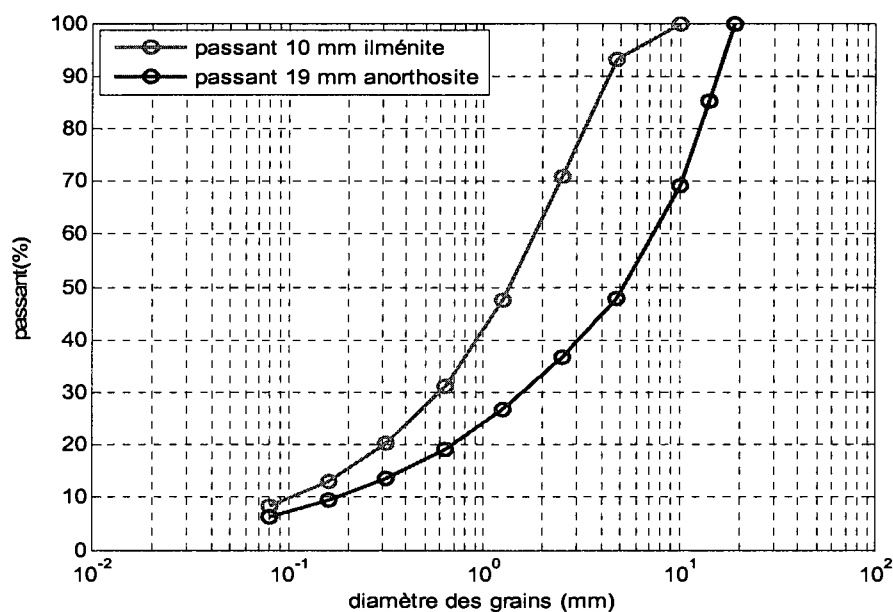


Figure 4.2 : Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage des matériaux réutilisés (passant 19 mm d'anorthosite et le passant 10 mm d'ilménite)

Tableau 4.3 : Propriétés physiques de base des matériaux dans des colonnes montées

Colonnes	D ₁₀ (cm)	D ₆₀ (cm)	C _U	Porosité moyenne au montage	Porosité moyenne démontage	Densité relative
Passant 10 mm avec système d'électrodes. (figure 4.1)	0,008	0,31	38,75	0,249	0,253	3,698
Passant 10 mm sans système d'électrode. (figure 4.1)	0,008	0,31	38,75	0,253	0,269	3,698
Passant 10 mm, ilménite, avec système d'électrode. (figure 4.2)	0,01	0,18	18	0,269	0,247	4,061
Colonne passant 19 mm. (figure 4.2)	0,017	0,7	41,18	0,23	0,234	3,698

Tableau 4.4 : Exemple de données sur le montage de la colonne (passant 10 mm) avec le système d'électrode

Diamètre intérieur moyen de la colonne : 29,05 cm					
Hauteur totale moyenne du cylindre : 98,22 cm					
Hauteur totale du matériau dans la colonne = 84,98 cm					
Masse de la colonne remplie d'eau avec accessoire : 95,3 kg					
Masse de la colonne avec accessoire : 29,8 kg					
Teneur en eau massique moyenne au moment de la mise en place : 1,64%					
Couches du bas vers le haut	Masse sol humide (g)	Masse sol sec (g)	Épaisseur couche (cm)	Volume total couche (cm³)	Porosité
c1	10000,0	9836,1	5,6	3720,5	0.285
c2	10000,0	9836,1	5,5	3628,1	0.267
c3	8421,1	8283,0	4,2	2770,6	0.192
c4	10000,0	9836,1	5,6	3694,1	0.280
c5	10000,0	9836,1	5,1	3351,1	0.206
c6	10000,0	9836,1	5,8	3826,0	0.305
c7	10000,0	9836,1	5,3	3483,0	0.236
c8	10000,0	9836,1	5,3	3522,6	0.245
c9	10000,0	9836,1	5,7	3746,9	0.290
c10	10000,0	9836,1	5,0	3298,3	0.194
c11	10000,0	9836,1	5,6	3667,7	0.275
c12	10000,0	9836,1	5,5	3628,1	0.267
c13	10000,0	9836,1	5,1	3364,3	0.209
c14	10000,0	9836,1	5,4	3549,0	0.251
c15	10000,0	9836,1	5,5	3628,1	0.267
c16	9420,7	9266,2	4,8	3192,7	0.215
				porosité moyenne : 0,249	

4.4.2 Écoulement de l'eau et modèles de prédiction

▪ Équations de base régissant l'écoulement

Dans un milieu saturé, l'écoulement de l'eau entre deux points A et B est caractérisé par la loi de Darcy :

$$q = -ik_{sat} \quad (4.4)$$

où q est le débit spécifique (m/s), appelé aussi vitesse de Darcy, k_{sat} est la conductivité hydraulique du milieu (m/s) et i est le gradient hydraulique en (m/m). Ce dernier paramètre est défini comme étant le rapport de la variation de la charge hydraulique sur la différence de position entre les deux points A et B :

$$i = \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{h_A - h_B}{Z_A - Z_B} \quad (4.5)$$

où ∂z représente une distance selon l'axe de l'écoulement.

En 3D, la loi de Darcy s'écrit sous la forme tensorielle suivante :

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = -[\mathbf{k}_{ij}] \begin{pmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Où q_i est le débit unitaire dans la direction i , k_{ij} est le tenseur de la conductivité hydraulique et i_i est le gradient hydraulique dans la direction i . Cette généralisation de la loi de Darcy est valide dans le cas d'écoulement pour les milieux poreux saturés. Richards (1931) a adapté la loi de Darcy afin de décrire l'écoulement de l'eau en milieu non saturé pour un régime permanent ou transitoire (Hillel, 1998) :

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial x} (k_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (k_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z} (k_z(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z}) + \frac{\partial k_z(\psi)}{\partial z} \quad (4.7)$$

avec

$q_{x,y,z}$: Débit spécifique suivant la direction x , y et z (m/s);

ψ : Succion matricielle (m);

θ : Teneur en eau volumique en un point du milieu.

Dans cette équation, connue comme étant l'équation de Richards, la valeur de k varie avec θ et ψ . L'équation peut s'exprimer également en termes des débits spécifiques et des charges hydrauliques. Elle est habituellement résolue numériquement.

▪ **Modèles de prédiction de la conductivité hydraulique à saturation (k_{sat})**

La conductivité hydraulique à saturation, k_{sat} , est considérée comme une des propriétés les plus importantes pour la conception des aires d'entreposage des stériles miniers. Cette propriété influence beaucoup les conditions d'infiltration dans les haldes ainsi que la migration des contaminants. En général, la distribution granulométrique d'un matériau, et plus particulièrement la fraction fine, influence grandement sa conductivité hydraulique. En effet, plus les particules sont fines, plus les vides sont petits avec pour conséquence une résistance accrue à l'écoulement dans le sol. D'autres paramètres influencent également la valeur de k , notamment le degré de saturation et la présence de l'air qui bloque le passage de l'eau, la forme et la texture des particules ainsi que la viscosité de l'eau (Gamache- Rochette, 2004).

Dans la littérature, il y a plusieurs modèles théoriques de prédiction de la conductivité hydraulique saturée des sols en fonction de leurs propriétés de base. Pour les sols grossiers comme les stériles étudiés ici, les modèles utilisés sont celui de Kozeny-Carman (KC) (Chapuis et Aubertin, 2003a) et Kozeny-Carman modifié (Mbonimpa et al, 2002). Les équations 4.8 et 4.9 présentent respectivement les modèles de prédiction de KC et KCM en fonction des propriétés physiques des stériles. Pour le modèle KC, on écrit :

$$k_{sat} = C \frac{g \cdot e^3}{\mu_w \cdot \rho_w \cdot S^2 \cdot D_r^2 (1 + e)} \quad (\text{cm/s}) \quad (4.8)$$

Avec :

C : Facteur de forme et de tortuosité du grain, généralement égal à 0.2 ;

g : Constante gravitationnelle ($9,81\text{m/S}^2$) ;

μ_w : Viscosité dynamique de l'eau (10^{-3} Pa.s à 20°C) ;

ρ_w : Masse volumique de l'eau (998 kg/m^3) ;

e : Indice des vides du matériau ;

D_r : Densité relative des grains solides ;

S : Surface spécifique des grains en m^2/kg ; elle est calculée à partir de la relation 4.9.

$$S = \frac{6}{\rho_s} \sum \left(\frac{P_{NOD} - P_{NOd}}{d_{eq}} \right) \quad (4.9)$$

Où $P_{NOD} - P_{NOd}$: est le pourcentage en masse de grains qui ont un diamètre entre d et D .

$$d_{eq}^2 = \frac{D_{min}^2}{3} \quad (4.10)$$

avec d_{eq} , e le diamètre équivalent.

Le tableau 4.5 montre un exemple de calcul de la surface spécifique pour les stériles (passant 10 mm). Dans ce cas, le diamètre minimum mesurable est : 0.08 mm donc $d_{eq}=0,046\text{ mm}$, ainsi la surface spécifique est de l'ordre de $5.96\text{ m}^2/\text{kg}$.

Tableau 4.5 : Exemple de calcul de la surface spécifique

Taille (mm)	Passant cumulative (%)	Différence ($P_{N0D}-P_{N0d}$)/100	($6/d.\rho_s$) (m^2/kg)	(($P_{N0D}-P_{N0d}$)/100) . ($6/d.\rho_s$) (m^2/kg)
50,000	100,000	0,000	-	-
37,500	100,000	0,000	0,043	0,00
25,000	100,000	0,000	0,065	0,00
19,000	100,000	0,000	0,085	0,00
14,000	100,000	0,000	0,116	0,00
10,000	100,000	0,000	0,162	0,00
4,750	69,090	0,3091	0,342	0,11
2,500	55,090	0,1400	0,649	0,09
1,250	39,950	0,1514	1,298	0,20
0,630	28,600	0,1135	2,575	0,29
0,315	20,030	0,0857	5,151	0,44
0,160	13,770	0,0626	10,141	0,63
0,080	9,500	0,0427	20,281	0,87
0,046	0,000	0,0950	35,119	3,34
Surface spécifique = 5,96 m²/kg				

L'équation 4.11 présente le modèle de prédiction de Kozeny-Carman modifié (KCM) :

$$k_{sat} = C_G \frac{\gamma_w e^{3+x}}{\mu_w (1+e)} (C_U)^{1/3} (D_{10})^2 \quad (4.11)$$

Avec

C_G : Facteur de forme (0.1) ;

γ_w : Poids volumique de l'eau (9,8 kN/m³);

μ_w : Viscosité dynamique (0,001 Pa.s) ;

D_{10} : Diamètre correspondant à 10% de la masse de l'échantillon (cm);

C_U : Coefficient d'uniformité (D_{60}/D_{10});

x : Paramètre qui tient compte de la tortuosité ($x=2$).

Le tableau 4.6 présente les résultats de mesure de k_{sat} et une comparaison avec les valeurs déduites à l'aide des méthodes de prédiction.

Tableau 4.6 : Comparaison des k_{sat} prédites et mesurées, pour les 4 colonnes montées

Colonnes	k_{sat} prédite (cm/s)		k_{sat} : charge constante (cm/s) (valeurs moyenne de 4 essais)		k_{sat} : charge variable (cm/s) (valeurs moyennes de 4 essais)	
	KC	KCM	k_{sat} min	k_{sat} max	k_{sat} min	k_{sat} max
Colonne passant 10 mm avec le système d'électrodes	$1,15 \times 10^{-2}$	$6,7 \times 10^{-4}$	$9,8 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$
Colonne passant 10 mm sans système d'électrodes	$1,18 \times 10^{-2}$	$7,7 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$0,71 \times 10^{-2}$	$0,75 \times 10^{-2}$
Colonne passant 19 mm sans système des électrodes	$1,82 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$1,15 \times 10^{-2}$	$4,71 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-2}$
Colonne passant 10 mm, ilménite avec système d'électrodes	$1,3 \times 10^{-2}$	$9,6 \times 10^{-4}$	$9,85 \times 10^{-3}$	$1,18 \times 10^{-2}$	$1,08 \times 10^{-2}$	$2,03 \times 10^{-2}$

L'analyse des résultats, tableau 4.6 et figure 4.3, montre que la meilleure corrélation entre les mesures au laboratoire et les modèles de prédiction (basées sur la granulométrie au montage) se fait entre le modèle de KC et les mesures à charge variable ou constante. On note également que les conductivités à charge constante et variable sont du même ordre de grandeur. Les valeurs de k_{sat} déduites à l'aide du modèle de KCM sont plus faibles (presque deux ordres de grandeurs) que celles mesurées. Il faut noter aussi que les mesures de k_{sat} à charge variable sont plus précises que celles à charge constante qui sont affectées par des problèmes de blocage

des piézomètres par les particules fines. On note également que les valeurs obtenues pour les deux colonnes passant 10 mm (avec et sans système d'électrodes) sont assez similaires. Ceci indique que le système d'électrodes n'influence pas beaucoup les mesures de k_{sat} . Les valeurs de k_{sat} prédites sont calculées à partir des données de la granulométrie des matériaux avant le montage.

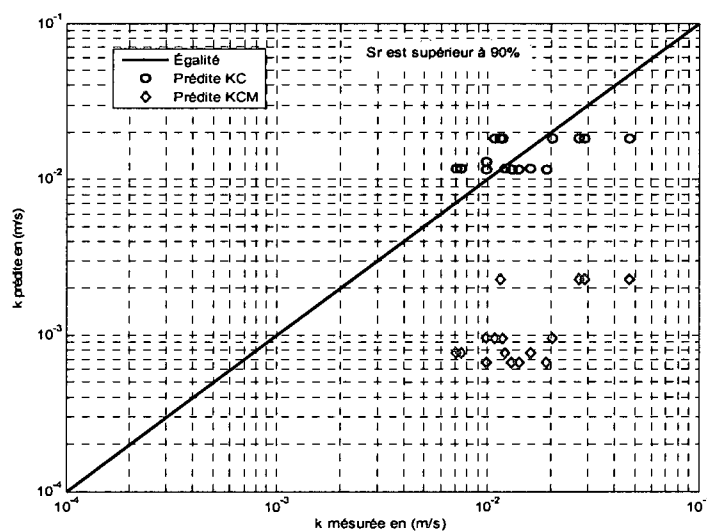


Figure 4.3 : Valeurs de k_{sat} mesurée, charge variable et charge constante en fonction de k_{sat} prédite par les modèles KC et KCM

4.5 Essai de traceur

Un des objectifs des essais de traceur consiste à étudier le problème des écoulements préférentiels. Considérant un matériel homogène saturé initialement avec un fluide de concentration en sel, C1, la resaturation de ce matériel avec un autre fluide de concentration C2 devrait conduire en sortie à un passage brutal de C1 à C2. Pour les matériaux naturels poreux, tels que les stériles étudiés ici, ce comportement est loin d'être le cas puisqu'on assiste à un effet de dispersion où l'avancement du traceur n'est pas le même par tout dans l'échantillon. Cette dispersion provient essentiellement aux facteurs suivants (Fetter, 1998) :

- La taille variable des pores : plus leurs dimensions sont importantes plus la vitesse d'écoulement est grande;
- Le frottement sur la surface des grains : l'eau qui s'écoule loin de la surface des pores aura une vitesse plus importante que celle circulant proche des surfaces des grains;
- La distribution des pores : l'eau suit des chemins de longueurs différentes pour rejoindre le même point en sortie;
- L'effet des chemins préférentiels causé particulièrement aux anomalies de la structure interne avec hétérogénéité, anisotropie et fractures.

Les essais de traceur ont été réalisés dans deux colonnes, soit les matériaux passant 10 mm et 19 mm. Ces mesures n'ont pas été faites sur les colonnes avec le système d'électrodes afin de ne pas influencer les mesures géophysiques. Nous avons utilisé une solution de NaCl avec une concentration de 40 g/l. Les courbes d'étalonnage du conductivimètre pour les deux cas sont données par l'annexe 4.3. Il faut noter ici que le mélange aqueux du sel doit être bien brassé afin de solubiliser le sel et éviter son dépôt en bas du réservoir (Gaillot, 2007).

Dans cette étude, on s'est limité à la présentation des résultats obtenus et l'analyse de la partie injection de la colonne passant 10 mm; le traitement et l'interprétation des autres données seront réalisés par d'autres étudiants travaillant dans le même cadre.

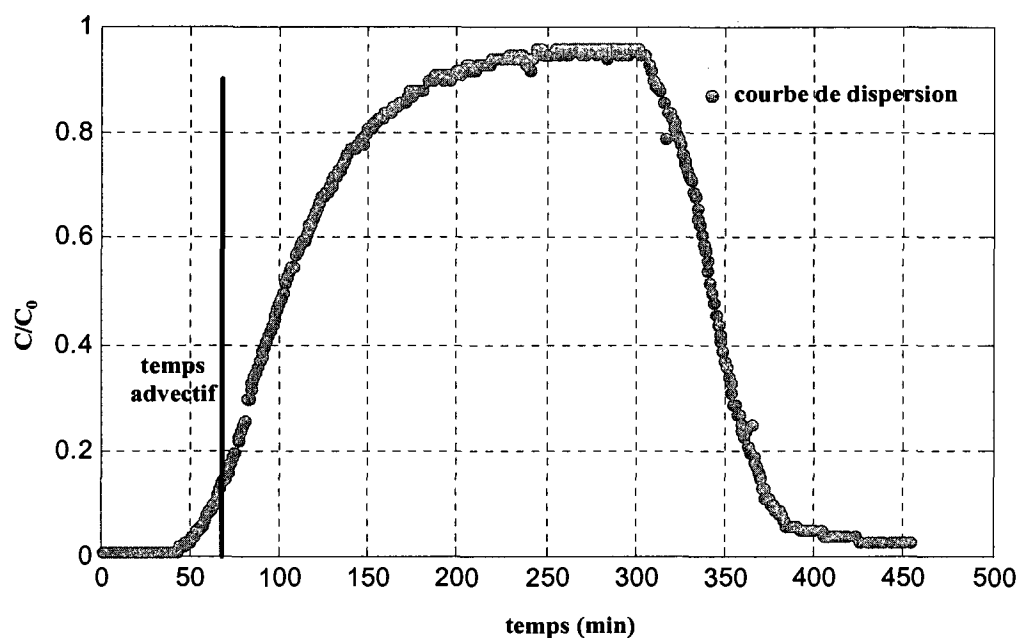


Figure 4.4 : Concentration normalisée en NaCl du fluide à la sortie en fonction du temps (passant 10 mm), essai à charge quasi-constante

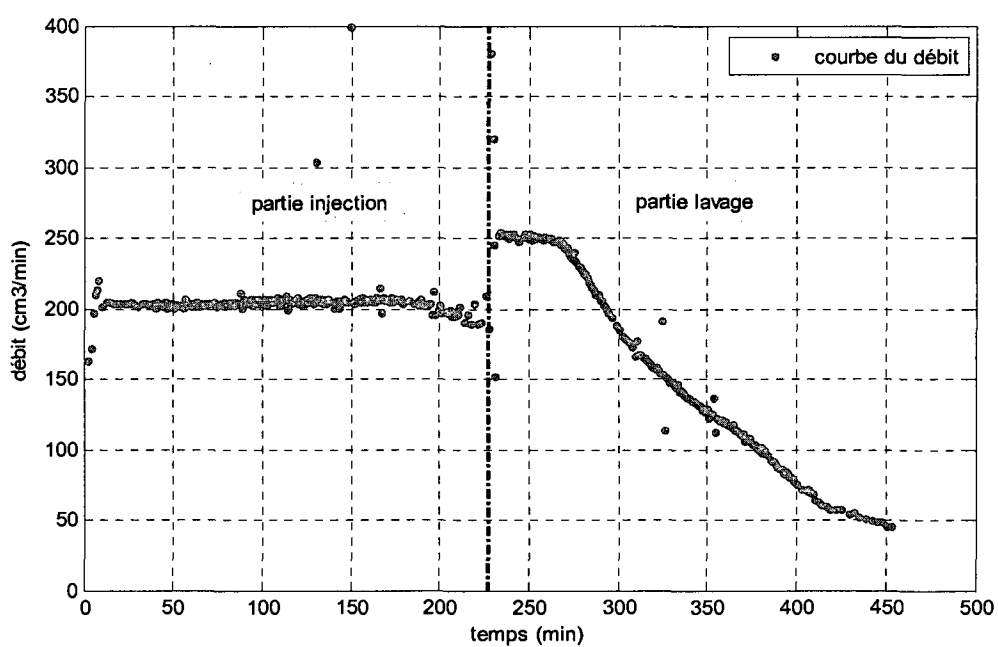


Figure 4.5 : Débit à la sortie en fonction du temps (passant 10 mm)

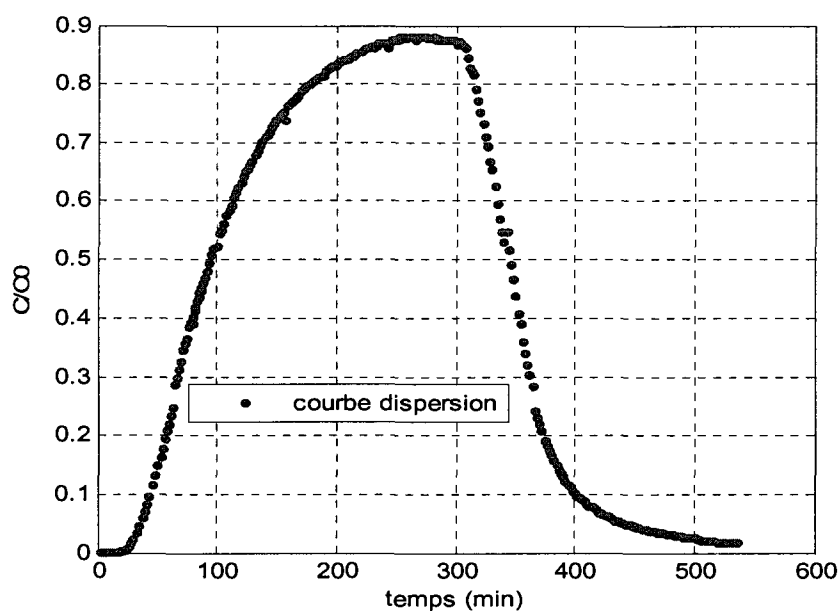


Figure 4.6 : Concentration normalisée en NaCl du fluide à la sortie en fonction du temps (passant 19 mm), essai à charge quasi-constante

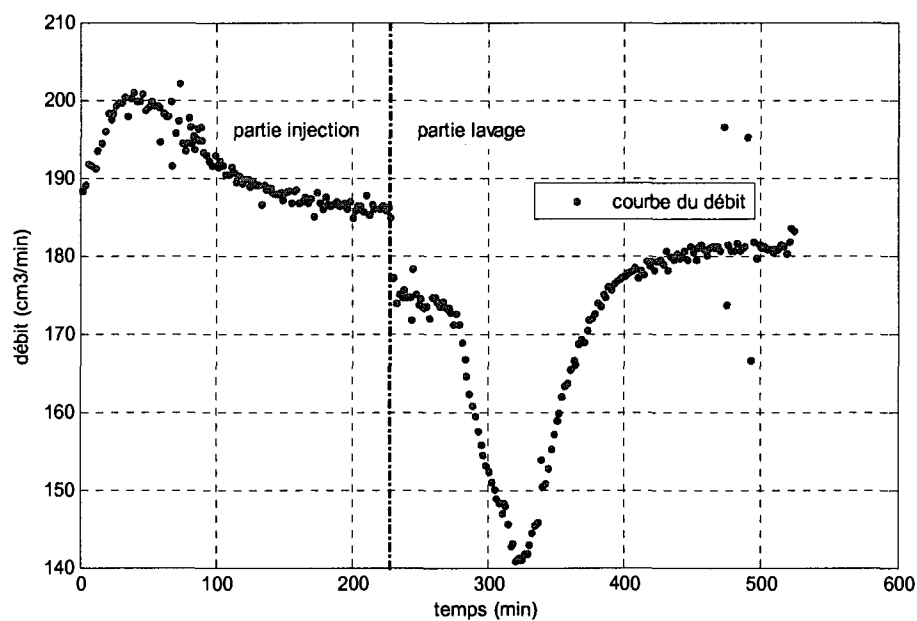


Figure 4.7 : Débit à la sortie en fonction du temps (passant 19 mm)

Durant la phase de lavage (ou rinçage avec l'eau propre) pour le passant 10 mm (figure 4.4), un phénomène inattendu s'est produit, soit une diminution très marquée du débit en fonction du temps après 36 min du début de l'essai. Ceci a été constaté alors qu'aucune des conditions du test n'a été changée (Δh est constant). De plus, le test du traceur pour la colonne passant 19 mm a été marqué par une erreur vers la 250^{ème} minute. En effet, nous avons oublié d'ouvrir le tube de Mariotte dans le réservoir, ce qui a induit une diminution significative du débit (vers la 320^{ème} minute). Après correction du problème, le débit s'est stabilisé vers une valeur de 180 cm³/min. La courbe de débit montre une montée dans les premières 80 minutes puis une descente pour finir à 185 cm³/min à la fin de la 1^{ère} partie du test. On note également que pour les deux courbes (figures 4.4 et 4.6), la concentration en sel du fluide à la sortie, enregistrée au niveau des plateaux, n'atteint pas celle du fluide au réservoir ($C/C_0 < 1$).

Dans la suite, on définit quelques paramètres essentiels pour l'analyse de la dispersion. Il s'agit du diamètre équivalent et le nombre de Peclet donnés respectivement par les équations 4.12 et 4.13.

$$D_H = [1 + 1.17 \log(C_U)] D_{10} \quad (4.12)$$

D_H : Diamètre équivalent des grains du matériau de colonne (cm) (Aubertin et al, 2003) ;

C_U : Coefficient d'uniformité.

$$N_{PE} = \frac{D_H V_x}{D_d} \quad (4.13)$$

N_{PE} : Nombre de Peclet;

V_x : Vitesse d'écoulement interstitiel selon la direction principale (en x);

D_d : Coefficient de diffusion moléculaire en milieu poreux (cm²/s).

Les tableaux 4.7 et 4.8 présentent les paramètres requis pour procéder à l'analyse de la dispersion.

Tableau 4.7 : Paramètres de montage des deux colonnes pour les essais de traceur

	QIT passant 10 mm	QIT passant 19 mm
D₁₀ (cm)	0,008	0,017
D₆₀ (cm)	0,31	0,7
C_U	38,75	41,18
n : porosité	0,253	0,234
D_H (cm)	0,023	0,049
Sr : degré de saturation	98,8	85,5
θ : teneur en eau	0,250	0,2

Tableau 4.8 : Principaux paramètres d'écoulement pour la phase d'injection du traceur (passant 10 mm)

QIT passant 10 mm (Injection)	
Q_{moy}(cm³/min)	206.5 (avant 227 min)
Section de la colonne, A (cm²)	663,9
Longueur de l'échantillon, L (cm)	83,8
Vitesse de Darcy : V_a en (cm/min) ou (cm/s)	0,311
V_x=(V_a/n) (cm/min)	1,23
t_{adv} =L/V_x (min)	67,6
N_{PE}	47,53
K_{sat} (charge variable)	0,75 ×10 ⁻²

L'analyse de la dispersion se fait à travers la résolution de l'équation d'advection-dispersion provenant des lois de la thermodynamique. Pour les essais en colonne (une dimension), et en considérant que la sorption, l'adsorption et l'échange d'ions sont des phénomènes négligeables, l'équation d'advection-dispersion peut s'écrire comme suit (Ogata et Banks, 1961) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4.14)$$

Les conditions initiales pour la résolution de l'équation 4.14 dans le cas des colonnes sont les suivantes :

- 1- Avant le début de l'essai, la concentration en sel est nulle pour toute la colonne;
- 2- Durant tout l'essai, à $x=0$, $C=C_0$ (phase d'injection).

La solution de l'équation 4.14 est alors donnée par l'équation 4.15 (Ogata et Banks, 1961 ; Domenico et Schwartz, 1998).

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - tV_x}{2(tV_x\alpha_L)^{1/2}} \right) \right] + \exp \left(\frac{xV_x}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + tV_x}{2(tD_L)^{1/2}} \right) \quad (4.15)$$

Avec

D_L : Coefficient de dispersion longitudinale (m^2/h);

α_L : Dispersivité longitudinale (cm);

C : Concentration (g/l);

C_0 : Concentration initiale du traceur (g/l);

v_x : Vitesse moyenne d'écoulement (cm/min);

x : Position du front d'advection (cm);

t : Temps (min).

Le coefficient de dispersion longitudinale est lié à la dispersivité longitudinale via l'équation suivante :

$$D_L = \alpha_L V_x \quad (4.16)$$

Le 2^{ème} terme à droite de l'équation 4.15 est dans la plus part des cas considéré négligeable par rapport au premier terme (Domenico et Schwartz, 1998). De ce fait, la solution de l'équation 4.14 peut se résumer à la solution simplifiée suivante :

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - tV_x}{2(V_x \alpha_L t)^{1/2}} \right) \right] \quad (4.17)$$

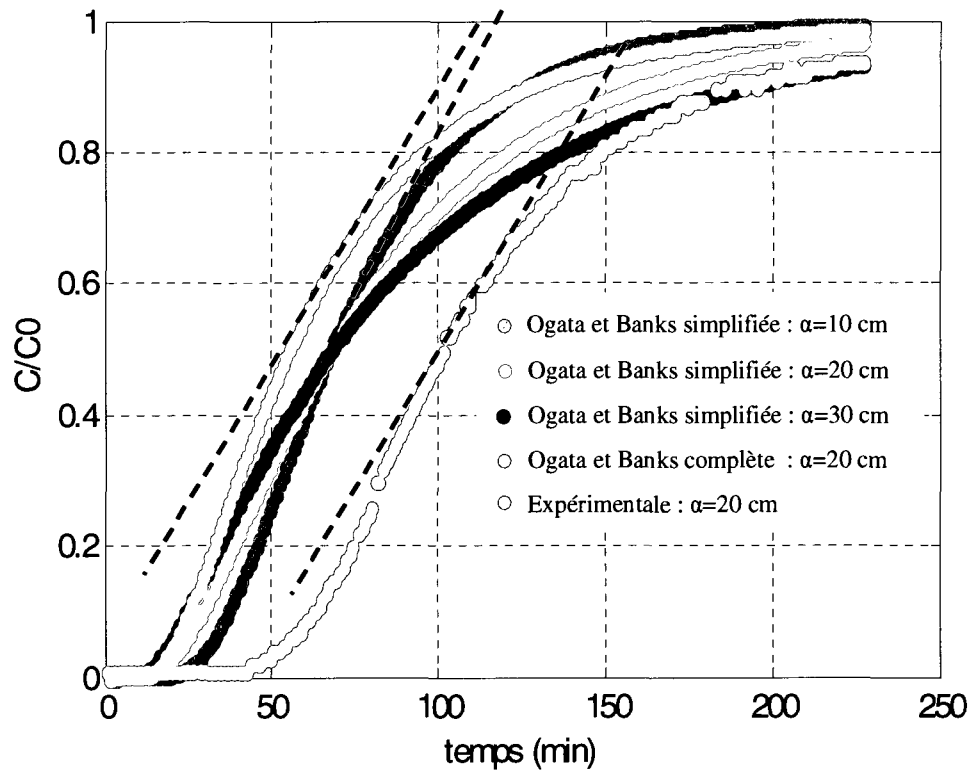


Figure 4.8 : Comparaison des courbes théoriques (selon l'équation de Ogata et Banks, 1961) et expérimentale (phase d'injection)

La figure 4.8 est obtenue en appliquant l'équation 4.15 pour différentes valeurs de α_L . Le choix des valeurs de α_L est basé sur des données de la littérature. On retient celle pour laquelle la courbe a une pente proche de celle de la courbe mesurée. Dans notre cas, on constate qu'une valeur de $\alpha_L=20$ cm permet d'avoir une courbe dont la pente est proche de la courbe expérimentale. Ainsi, le coefficient de dispersion longitudinale, D_L serait de l'ordre de $0.15 \text{ m}^2/\text{h}$.

La présente analyse montre que la valeur de la dispersivité longitudinale est un peu élevée pour cette échelle de mesure (84 cm, longueur de l'échantillon du matériau

dans la colonne). Cela indique probablement le développement des chemins préférentiels dans le matériau étudié. Des dispersivités plus faibles, entre 4 et 10 cm, ont été obtenues pour des études similaires réalisées au laboratoire sur des colonnes de 2 m de long (Eriksson et al, 1996). Les auteurs ont déduit l'absence des chemins préférentiels pour ces grandeurs de α_L .

4.6 Essai de drainage

Après les mesures de k_{sat} et les essais du traceur (avec rinçage pour enlever le sel) dans les colonnes sans système d'électrodes, nous avons procédé aux tests de drainage. Tout d'abord, on commence par l'étalonnage des tensiomètres puis on procède à la saturation des capteurs de pression déjà installés au niveau de la colonne en leur appliquant des suctions négatives. Avant l'essai, les tensiomètres sont branchés au niveau des capteurs de pression afin d'avoir un état d'équilibre des capteurs. On attend alors jusqu'à ce que les valeurs de pressions indiquées par les tensiomètres soient proches des pressions imposées au niveau des 3 capteurs. L'essai de drainage libre permet d'obtenir la courbe de rétention d'eau après le démontage. Le tuyau de sortie d'eau du bas est mis à 10 cm plus haut que la base de la colonne. Les paramètres à noter durant l'essai sont respectivement le volume d'eau recueilli en fonction du temps t , ainsi que le voltage aux bornes de chaque tensiomètre qui est converti par la suite en suction selon la courbe d'étalonnage. Après quelques heures de drainage (généralement entre 5 à 6 h), le volume d'eau recueilli devient faible et les suctions varient très peu. De ce fait, un relevé de mesure subséquent aux 2 ou 3 heures est suffisant pour suivre le test. Après quelques jours, le volume d'eau recueilli devient négligeable (en général moins d'un gramme d'eau par jour). Ensuite, les deux sorties sont fermées jusqu'au démontage.

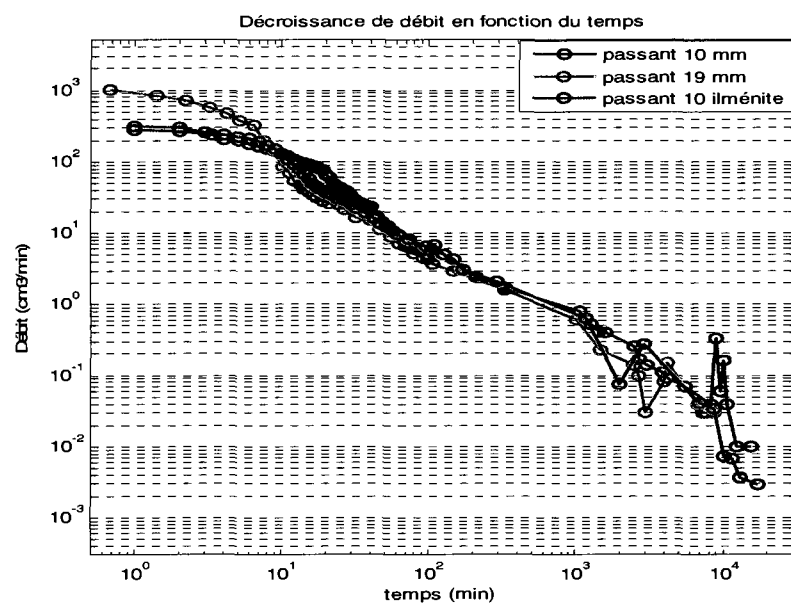


Figure 4.9 : Débit en fonction du temps lors des essais de drainage libre des colonnes

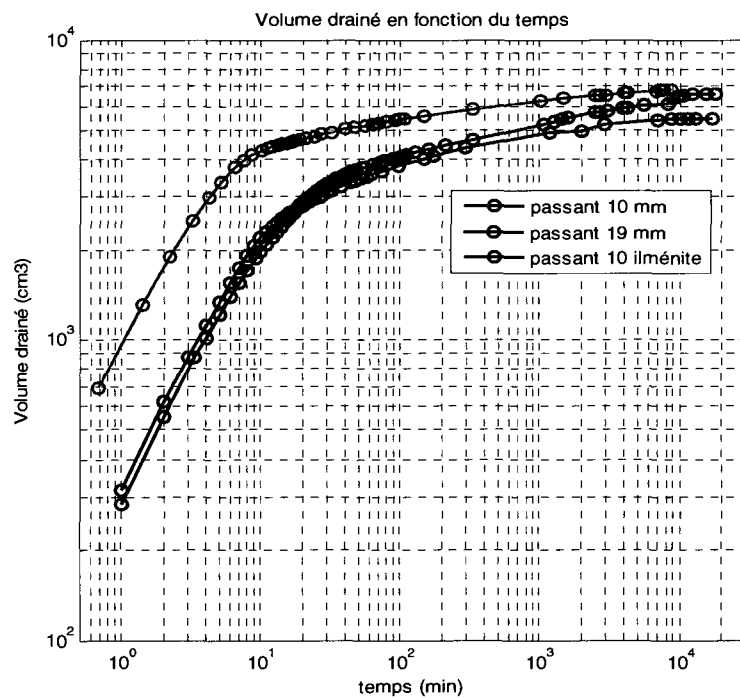


Figure 4.10 : Volume d'eau drainée en fonction du temps

Les résultats obtenus sont montrés aux figures 4.9 et 4.10. L'analyse de ces figures montre que les deux colonnes avec le passant 10 mm (d'anorthosite et d'ilménite) se drainent de la même façon durant le temps. Pour la colonne avec le passant 19 mm, le débit est plus important pour les premières minutes et converge ensuite vers les mêmes valeurs que celle des autres matériaux.

4.7 Démontage et courbe de rétention d'eau (CRE)

4.7.1 Mesure de la courbe de rétention d'eau au laboratoire

Au laboratoire, la détermination de la CRE est réalisée à partir de la récupération du matériel par tranche d'environ 5 cm d'épaisseur au démontage des colonnes drainées. Cette opération est réalisée après la fin du drainage. La masse et l'épaisseur (volume) sont notées pour chaque couche. Ensuite le matériau de la couche est mis dans le four à 105°C pour une durée d'au moins 24 heures. La différence de masse du matériau d'une couche dès son extraction et après un passage au four permet de déduire la teneur en eau massique. On note qu'on laisse toujours une couche saturée en bas d'une épaisseur d'environ 10 cm jouant le rôle d'une nappe phréatique. Cependant, le phénomène de la remontée de l'eau par capillarité rend difficile la récupération du matériau d'une couche avec la quantité d'eau exacte associée à elle avant le démontage. Ce phénomène est observé surtout vers le bas de la colonne. Le tableau 4.9 montre un exemple de résultats obtenus au démontage de la colonne (passant 10 mm sans système d'électrodes).

Tableau 4.9 : Données de démontage de la colonne du passant 10 mm (sans système d'électrodes)

Couche du haut vers le bas	Masse sol humide (g)	Teneur en eau massique w	Volume de l'eau (cm ³)	Volume total couche	Porosité moyenne n	$\Theta =$ w (1-n).Dr	Sr (%)
couche 1	14327	3,22	446,8	5298,2	29,16	0,0843	28,923
couche 2	14438,4	3,05	427,1	5032,7	24,71	0,0849	34,339
couche 3	16584,9	3,32	532,5	5683,3	23,62	0,0937	39,665
couche 4	14222,3	3,48	478,2	4926,4	24,56	0,0971	39,527
couche 5	12828,1	3,77	466,6	4860,0	31,22	0,0960	30,752
couche 6	13100,4	4,18	525,2	4753,8	28,47	0,1105	38,810
couche 7	11421,4	4,92	535,5	3850,9	23,56	0,1391	59,032
couche 8	12028	5,71	650	4302,3	28,49	0,1511	53,038
couche 9	8280,1	8,77	667,8	3014,3	31,71	0,2215	69,868
couche 10	11580,2	9,26	981	3890,7	26,33	0,2521	95,754
couche 11	7568,5	9,27	642,2	2403,5	22,07	0,2672	121,060
couche 12	21910,5	9,41	1883,7	7635,3	29,07	0,2467	84,861

Les données expérimentales des autres matériaux (passant 10 mm d'ilménite et le passant 19 mm) sont données dans les annexes (sur le CD joint à ce rapport).

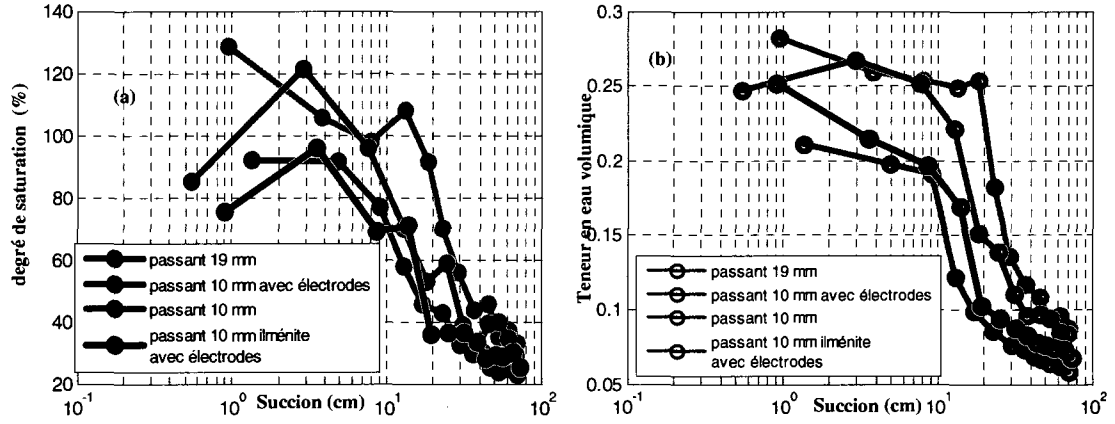


Figure 4.11 : Comparaison des CRE des matériaux montés, (a) degré de saturation en fonction de la succion, (b) teneur en eau volumique en fonction de la succion

Les mesures sont lissées en utilisant le modèle de van Genuchten (1980). Ce modèle est décrit par l'équation suivante :

$$\theta = \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (\alpha \psi)^{n_v} \right)^{m_v}} \right) + \theta_r \quad (4.18)$$

où $1/\alpha_v \cong$ pression d'entrée d'air (ψ_{aev});

m_v et n_v : constantes d'ajustement du modèle; on utilise souvent $m_v = 1 - (1/n_v)$;

θ_s : teneur en eau volumique à saturation.

La figure 4.12 montre les mesures lissées pour deux matériaux (passant 10 et 19 mm) avec les valeurs de la pression d'entrée d'air (ψ_{aev}) et la pression résiduelle (ψ_r) obtenues à l'aide de la méthode graphique.

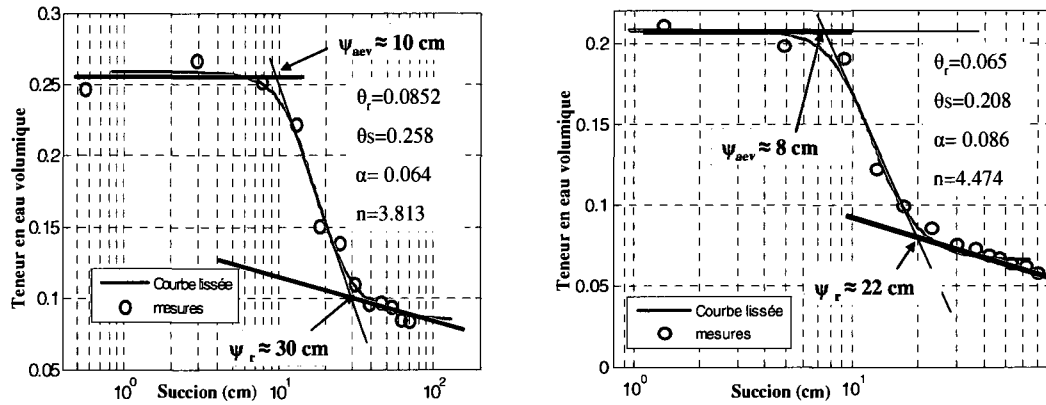


Figure 4.12 : Exemple de courbes lissées, les paramètres déduits du lissage sont données sur les courbes

L'analyse des figures 4.11 et 4.12 montre que pour les faibles succions, les CRE manifestent des variations non cohérentes surtout dans les cas des matériaux passant 10 mm d'ilménite et d'anorthosite. Ce phénomène est causé essentiellement par un problème de la remontée capillaire de l'eau qui rend difficile l'extraction d'un matériel d'une couche avec juste de l'eau associée à elle avant le démontage. La difficulté de la détermination du volume exact de chaque couche (difficulté à démonter des couches assez planes) entraîne aussi des imprécisions qui peuvent expliquer ces variations non cohérentes dans les CRE. La comparaison des CRE pour les 4 colonnes (figure 4.11) montre que la suction d'entrée d'air est plus faible pour le passant 19 mm (environ 7.5 cm) que pour les passants 10 mm (entre 10 et 20 cm). Également, la suction résiduelle est plus faible dans le cas du passant 19 mm (environ 22 cm) que dans le cas des passants 10 mm (autour de 35 cm). Ceci est expliqué en partie par le fait que la colonne passant 19 mm contient moins de particules fines qui sont responsables de la rétention d'eau.

Afin d'étudier la migration des particules fines au cours des essais, nous avons réalisé une analyse granulométrique de 3 échantillons prélevés respectivement en bas, au centre et en haut de chaque colonne.

Les figures 4.13 et 4.14 montre respectivement la granulométrie au démontage des passants 19 mm et 10 mm.

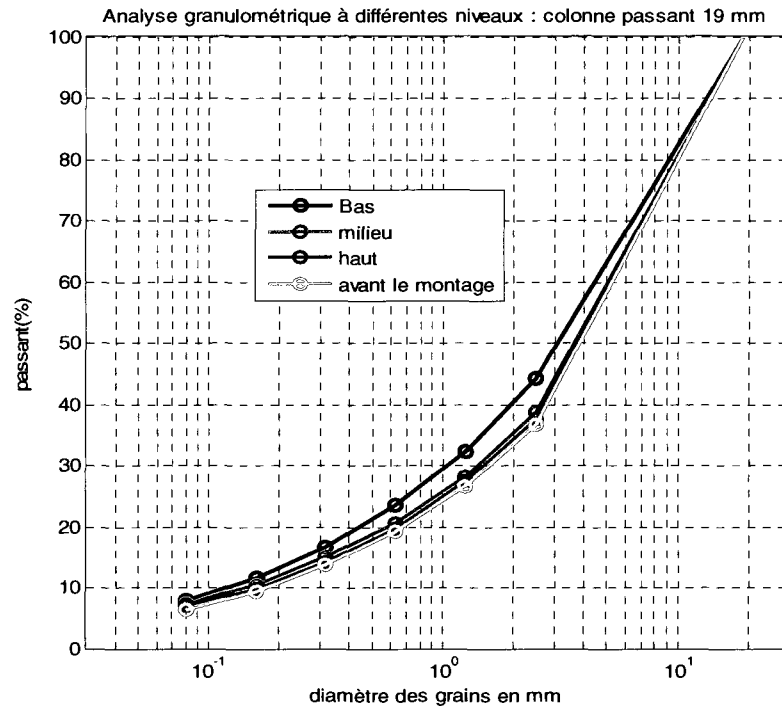


Figure 4.13 : Comparaison de la granulométrie à différents niveaux (matériau du passant 19 mm)

L'analyse de la granulométrie montre effectivement que la taille des particules en bas est plus petite que celles des échantillons pris au centre ou en haut de la colonne. Par exemple, pour un diamètre $d=0,16$ mm, on trouve en bas 11,5 % de la masse totale alors qu'au centre et en haut, on trouve respectivement seulement 10,51% et 9,87 %. Les échantillons pris au centre et en haut de la colonne ont presque le même fuseau granulaire que celui du matériel avant le montage. On note également que le mouvement de l'eau dans la colonne se fait dans les deux sens puisque la saturation se fait du bas en haut et la mesure de la conductivité hydraulique se fait du haut vers le bas. Par ailleurs, le drainage (du haut vers le bas) est la dernière opération effectuée

sur la colonne, donc possiblement cette migration des particules vers le bas (observée par mesure granulométrique) est produite seulement lors du drainage.

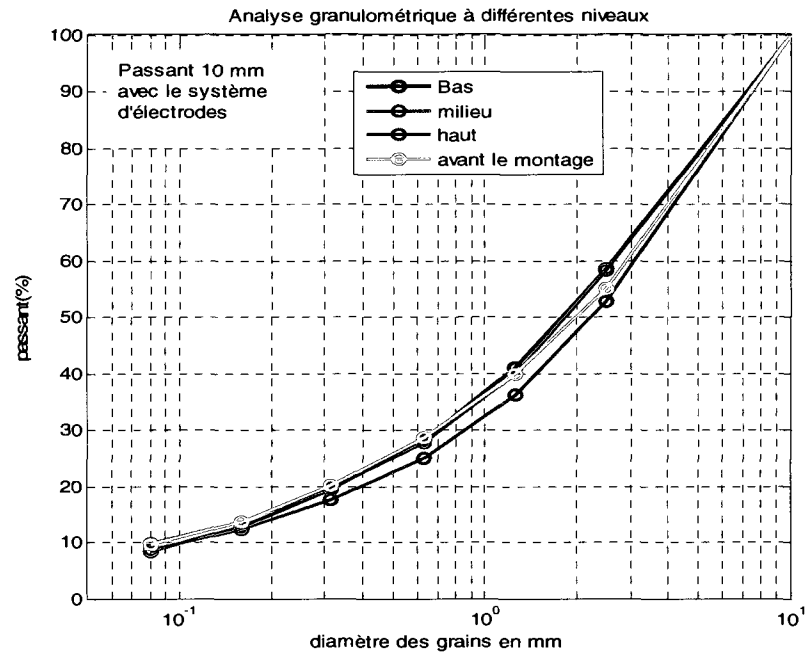


Figure 4.14 : Comparaison de la granulométrie à différents niveaux (matériau du passant 10 mm)

Pour le passant 10 mm, on constate que c'est le milieu de la colonne qui contient moins de particules fines. Par exemple pour un diamètre $d = 0,315$ mm, on trouve seulement 17,7 % de la masse totale contrairement aux bas et en haut où on a respectivement 19,4% et 19,6 %. Le mouvement de l'eau dans les deux sens, sous des gradients hydrauliques différents, est probablement le responsable de cette légère ségrégation granulométrique.

4.7.2 Modèle de prédiction de la CRE

La prédiction de l'écoulement de l'eau à travers les milieux poreux non saturés exige de l'information spécifique sur les propriétés non saturées du milieu, incluant la courbe de rétention d'eau (CRE). La CRE représente la relation entre la teneur en eau

volumique θ (ou S_r) du matériau et la succion (ψ) exercée. Les modèles de prédiction de la CRE pour les sols non saturés sont relativement rares, et toujours en voie de développement. Dans cette étude, nous utilisons le modèle modifié de Kovács, dénoté MK (par la suite Aubertin et al, 2003).

Ce modèle permet d'estimer la CRE en fonction des propriétés géotechniques de base du sol étudié, c'est-à-dire la porosité et les paramètres de la granulométrie. Dans ce modèle, le paramètre h_{co} est défini comme étant la remontée capillaire équivalente dans un milieu poreux. Son expression est dérivée de la formule de la remontée capillaire de l'eau dans un tube de diamètre d (Aubertin et al, 2003; Mbonimba et al, 2004). La formule de h_{co} , développée en fonction des propriétés physiques du sol, est donnée par l'équation

$$h_{co} = \frac{0.75}{[1.17 \log(C_U) + 1] e D_{10}}. \quad (4.19)$$

L'équation qui prédit la courbe de rétention d'eau, teneur en eau volumique en fonction de la succion et de la porosité est calculée à l'aide de l'équation (Mbonimba et al. 2006)

$$S_r = \frac{\theta}{n} = 1 - \langle 1 - S_a \rangle (1 - S_c). \quad (4.20)$$

La fonction de Macauley est calculée avec une fonction de la valeur absolue, (4.21) :

$$\langle x \rangle = 0.5(x + |x|). \quad (4.21)$$

Les variables S_c et S_a représentent respectivement les degrés de saturation causés par les forces capillaires et d'adhésion et elles sont définies respectivement par les équations (4.22) et (4.23)

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 + 1 \right]^m \exp \left[-m \left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 \right], \quad (4.22)$$

$$S_a = a_c \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{\psi_0}{\psi_r} \right)} \right] \frac{\left(\frac{h_{co}}{\psi_n} \right)^{2/3}}{e^{1/3} \left(\frac{\psi}{\psi_n} \right)^{1/6}}. \quad (4.23)$$

Plusieurs paramètres de l'équation de la CRE sont fixés. Il s'agit de :

a_c : Coefficient d'adhésion; il est de 0.01 pour des matériaux granulaires avec des unités de longueur en cm ;

ψ_0 : Succion pour une sécheresse totale de l'ordre de 10^7 cm (pour $\theta=0$);

ψ_n : Paramètre de normalisation (1 cm);

m : Inverse du coefficient d'uniformité, ($m= 1/C_U$);

ψ_r : Succion pour atteindre la teneur en eau résiduelle, elle est égale à :

$$\psi_r = 0,86(h_{co})^{1.2} \quad (4.24)$$

La CRE permet de déterminer deux paramètres importants qui sont la pression d'entrée d'air, ψ_{aev} , et la succion résiduelle, ψ_r .

4.7.3 Comparaison des mesures avec les modèles de prédiction de la CRE

Dans ce paragraphe nous présentons une comparaison des CRE, $\theta=f(\psi)$, mesurées et prédites. La variation du degré de saturation en fonction de la succion est présentée également puisque la porosité varie d'une couche à l'autre.

Les essais de drainage avec les grandes colonnes nécessitent beaucoup de temps afin d'atteindre la teneur en eau résiduelle car il est difficile d'appliquer des succions importantes ou bien d'attendre longtemps avant le démontage de la colonne. De ce fait, les teneurs en eau volumique pour des succions élevées, plus de 50 cm, sont corrigées à l'aide de la mesure de la teneur en eau résiduelle obtenue avec la petite colonne (paragraphe 4.8). La mesure de la teneur en eau résiduelle a été réalisée avec un matériau fin (passant 4,75 mm). Pour cette raison, on corrige la teneur en eau résiduelle, obtenue dans le cas de la petite colonne, suivant chaque matériau en considérant l'effet de l'ajout des grosses particules (augmentation du volume de solide

et réduction de la porosité). Cette correction est effectuée suivant l'équation de la teneur en eau volumique, $\theta = w(1-n)D_r$. Les corrections de la porosité et la teneur en eau massique sont effectuées respectivement selon les équations 4.25 et 4.26 en considérant que les particules dont le diamètre est supérieur à 4,75 mm ne retiennent pas d'eau et ne contiennent pas de vide (plus de détails dans l'annexe 4.4) :

$$n_{co} = \frac{n_{4,75}}{1 + (1 - n_{4,75}) \frac{M_s(d > 4,75)}{M_s(d \leq 4,75)}}, \quad (4.25)$$

$$n_{co} = \frac{w_{4,75}}{1 + \frac{M_s(d > 4,75)}{M_s(d \leq 4,75)}}, \quad (4.26)$$

Avec

n_{co} : Porosité corrigée pour une colonne de matériau donnée;

$n_{4,75}$: Porosité moyenne de la colonne résiduelle montée avec le matériau passant 4,75 mm;

$M_s (d \leq 4,75)$: Masse des particules solides dont le diamètre est inférieur à 4,75 mm dans la colonne à corriger;

$M_s (d > 4,75)$: Masse des particules solides dont le diamètre est supérieur à 4,75 mm dans la colonne à corriger;

$w_{4,75}$: Teneur en eau massique moyenne de la colonne résiduelle montée avec le matériau passant 4,75 mm;

w_{co} : Teneur en eau massique corrigée pour une colonne de matériau donnée.

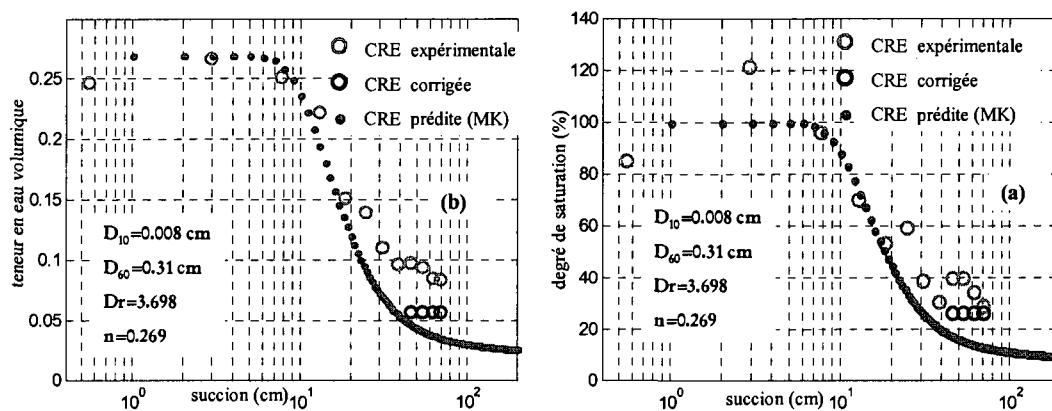


Figure 4.15 : Comparaison des CRE mesurées et prédites; (a) degré de saturation en fonction de la succion, (b) teneur en eau volumique en fonction de la succion, colonne avec le passant 10 mm (sans système d'électrodes)

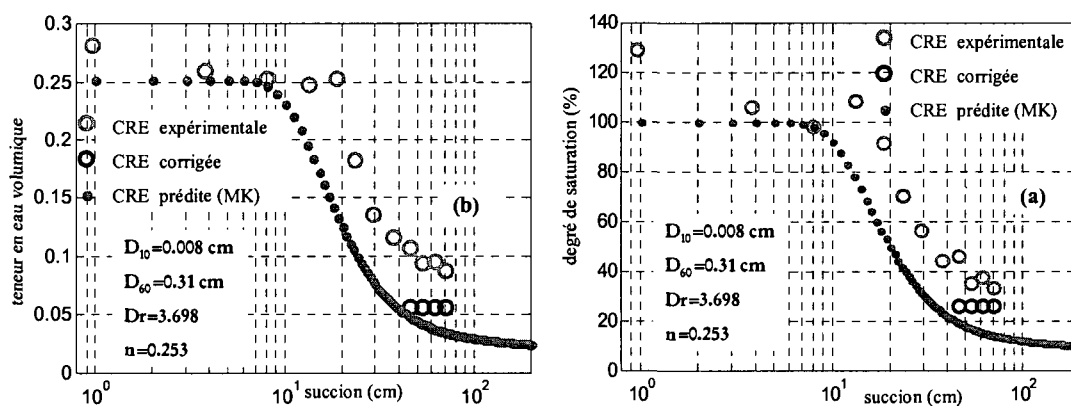


Figure 4.16: Comparaison des CRE mesurées et prédites; (a) degré de saturation en fonction de la succion, (b) teneur en eau volumique en fonction de la succion, colonne avec le passant 10 mm (avec système d'électrodes)

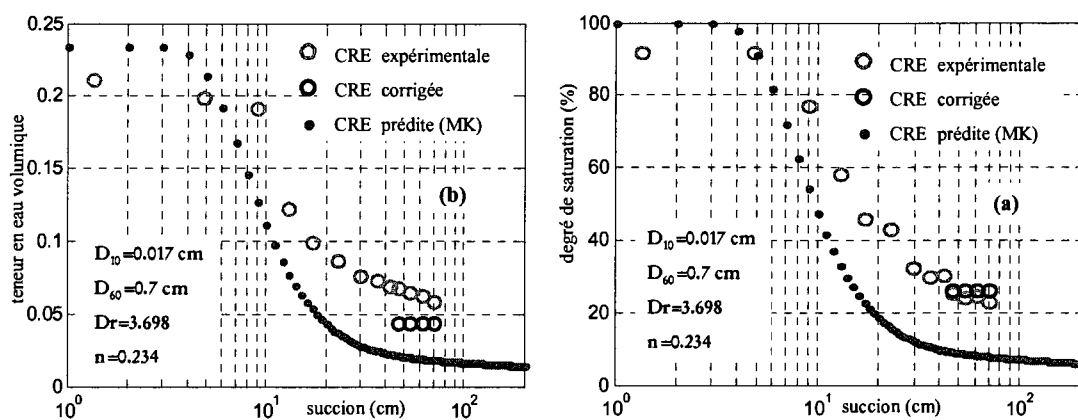


Figure 4.17 : Comparaison des CRE mesurées et prédites; (a) degré de saturation en fonction de la succion, (b) teneur en eau volumique en fonction de la succion, colonne avec le passant 19 mm

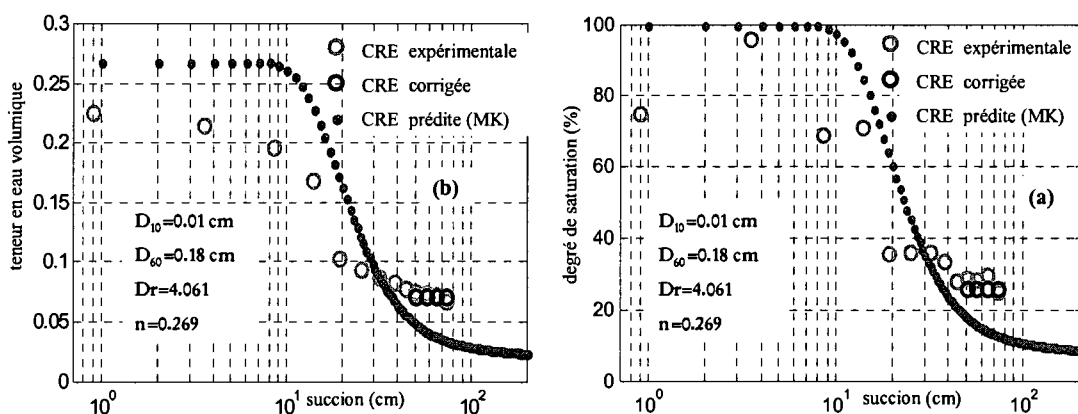


Figure 4.18 : Comparaison des CRE mesurée et prédite; (a) degré de saturation en fonction de la succion, (b) teneur en eau volumique en fonction de la succion, colonne avec le passant 10 mm (ilménite avec système d'électrodes)

L'analyse des comparaisons entre les valeurs expérimentales et prédites sont relativement proches, spécifiquement pour le passant 10 mm (sans système d'électrodes). La porosité utilisée dans le modèle de prédiction correspond à la porosité moyenne au démontage pour chaque colonne. Les valeurs de la pression

d'entrée d'air ($\psi_a = AEV$) obtenues avec la méthode graphique varient d'environ 4 cm pour le passant 19 mm à 10 cm pour la colonne d'ilménite.

On note également que pour les suctions supérieures à celle d'entrée d'air, les courbes prédites sont décalées vers la gauche par rapport aux courbes expérimentales, sauf pour celle de l'ilménite qui montre le contraire (pour des raisons non claires). Pour toutes les courbes, la teneur en eau résiduelle prédite est plus faible que les valeurs expérimentales. La correction apportée aux mesures pour les suctions élevées à l'aide des données de la petite colonne n'a pas permis d'atteindre la courbe prédite.

4.8 Détermination de la teneur en eau résiduelle

La teneur en eau résiduelle est définie comme étant l'eau que nous ne pouvons pas arracher du matériau sans l'apport de l'évaporation. De ce fait, elle renseigne sur la capacité de rétention minimale d'eau d'un matériau. Les essais de drainage avec les grandes colonnes nécessitent beaucoup de temps afin d'atteindre la teneur en eau résiduelle car il est difficile d'atteindre des suctions élevées. Cependant, les données en grandes colonnes peuvent être corrigées en utilisant la teneur en eau résiduelle déterminée à l'aide d'une petite colonne.

Dans cette optique, nous avons réalisé un essai avec une petite colonne d'un diamètre de 10 cm et d'une hauteur de 40 cm. Le matériel utilisé dans cet essai (passant 4,75 mm) est humidifié et bien mélangé avant le montage. Comme dans le cas des grandes colonnes, le montage est réalisé par couche d'environ 5 cm d'épaisseur. À la base de la colonne, nous plaçons une plaque poreuse en céramique (la pression supportée est de 3kbar) bien entourée avec des joints afin d'éviter tout échange d'air avec le milieu extérieur. Sous la pierre poreuse, il y a une plaque en PVC avec une sortie d'eau reliée à un tuyau de faible diamètre. Ce tuyau permet d'appliquer une succion négative par palier. Le haut de la colonne est bien fermé avec une plaque en PVC contenant une petite ouverture pour maintenir la pression atmosphérique et en même temps empêcher l'évaporation. Afin de vérifier la succion durant l'essai, deux capteurs de pression ont été ajoutés au système, ils sont installés respectivement à 2 cm et 20 cm

de la base de la pierre poreuse. Une fois le montage terminé, l'échantillon a été saturé sous vide du bas vers le haut. La saturation de la colonne a été réalisée après une période de 24 heures de repos afin d'assurer l'uniformité. Une fois la colonne bien saturée, la procédure de drainage est entamée en baissant la sortie du tube en U et en vérifiant que le tuyau est toujours saturé afin de garder la continuité de d'eau. La succion appliquée progressivement correspondait bien aux suctions données à l'aide des tensiomètres jusqu'à une valeur de 240 cm. Au-delà de cette valeur, les suctions lues à l'aide des tensiomètres deviennent plus faibles que les suctions négatives appliquées à la base de la colonne. Les suctions appliquées avec ceux mesurées au niveau des deux tensiomètres sont données sur l'annexe 4.5.

La figure 4.19 montre un schéma qui illustre le principe de la méthode de mesure de la teneur en eau résiduelle. L'essai a duré plus de 2 mois. Après cette période nous avons procédé au démontage de la colonne par couche d'environ 5 cm. La masse de chaque couche est notée dès l'extraction et après un passage au four de 24 heures à 105 °C. Le tableau 4.10 présente les données de démontage.

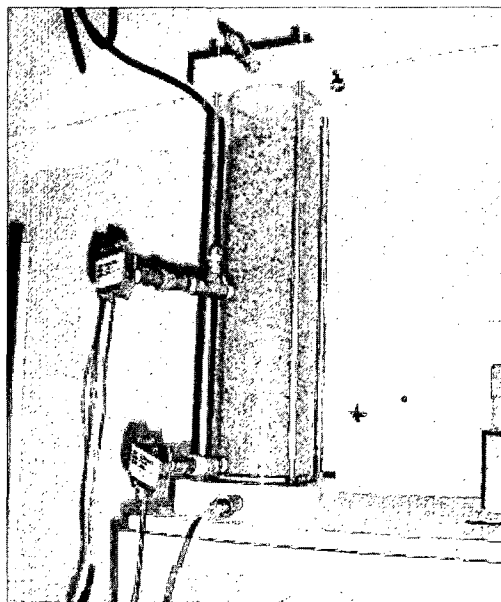


Figure 4.19: Photo montrant le montage utilisé pour la mesure de la teneur en eau résiduelle

Tableau 4.10 : Données de démontage de la colonne résiduelle

Couches du haut vers le bas	Masse sol humide (g)	Masse d'eau (g)	Teneur en eau $w=M_w/M_s$	Volume total couche (cm ³)	Porosité % $n=V_v/V_t$	$\Theta=V_w/V_t=$ $w(1-n) \times D_r$	Sr $=\Theta/n$ %
couche 1	950,5	25,0	2,70	344,96	27,45	0,07247	26,40
couche 2	876,4	24,6	2,89	321,44	28,34	0,07653	27,00
couche 3	784,1	22,4	2,94	293,22	29,75	0,07639	25,68
couche 4	878,8	24,8	2,90	326,14	29,19	0,07604	26,05
couche 5	872,3	24,3	2,87	323,01	29,01	0,07523	25,94
couche 6	737,4	21,7	3,03	272,83	29,06	0,07954	27,37
couche 7	1258,6	34,9	2,85	462,56	28,46	0,07545	26,51
couche 8	765,4	21,0	2,82	293,22	31,35	0,07162	22,85
couche 9	1033,4	29,6	2,95	410,82	33,93	0,07205	21,24

L'analyse des données du tableau 4.2 montre que la teneur en eau massique est presque homogène le long de la colonne avec une moyenne de 2,9 %. La porosité varie de 27,5 à 34 % mais il faut prendre en compte les erreurs liées à la lecture des épaisseurs des couches à cause de la difficulté de démonter des couches quasi planes. On note aussi que le degré de saturation augmente légèrement du bas vers le haut. Pour la teneur en eau résiduelle, elle varie entre 7,1 à 8 % avec une moyenne de l'ordre de 7,5 %.

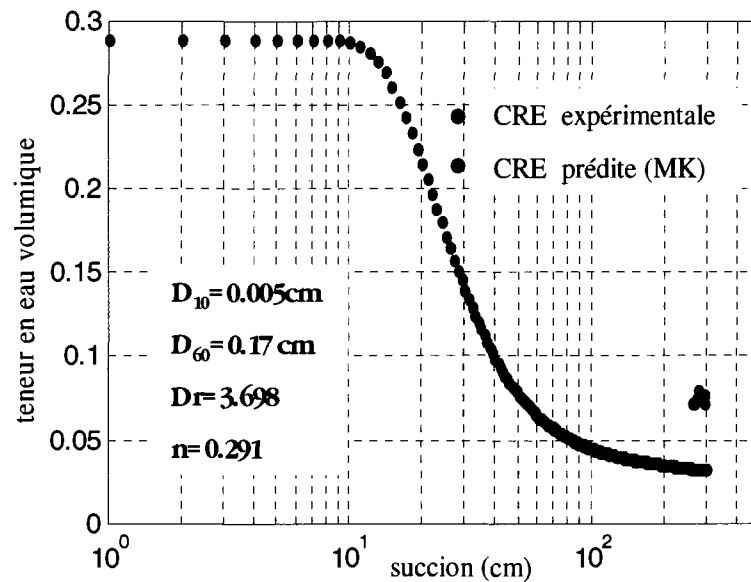


Figure 4.20 : Comparaison entre la teneur en eau résiduelle expérimentale et la CRE prédite selon le modèle MK

La figure 4.19 montre une comparaison de la courbe de rétention d'eau théorique selon le modèle MK avec celle mesurée. On note que la valeur prédite est plus petite que la valeur expérimentale.

4.9 Discussion des résultats

L'étude des propriétés hydriques des stériles a permis de mettre en évidence de nombreuses caractéristiques. Tout d'abord, la granulométrie de l'échantillon de référence est étalée. La porosité moyenne du matériel lors du montage dépend du pourcentage du gravier dans la colonne. Elle passe de 29 % pour la petite colonne résiduelle, réalisée avec la fraction moins de 4,75 mm, à 23 % pour le passant 19 mm. L'essai réalisé pour la mesure de la teneur en eau résiduelle a montré que cette dernière se situe autour de 7 %.

On note également qu'une bonne corrélation existe entre les mesures de k_{sat} et celles prédites à l'aide du modèle de KC. Les courbes de rétention d'eau mesurées varient suivant la granulométrie; plus on ajoute des cailloux, plus la CRE se déplace vers la

gauche et vers le bas. Les valeurs de la pression d'entrée d'air varient entre 10 cm pour le passant 19 mm à 20 cm pour le passant 10 mm. La teneur en eau résiduelle décroît également avec le pourcentage de gravier dans le matériel, elle passe de 6 % pour le passant 19 mm à 9 % pour le passant 10 mm.

La corrélation entre les CRE expérimentales et celles prédites à l'aide du modèle MK est moyenne, sauf pour le passant 10 mm d'anorthosite où les deux courbes sont assez proches.

Chapitre 5 : Étude des propriétés physiques des stériles

5.1 Introduction

L'étude des propriétés électriques des matériaux de la halde est essentielle pour l'analyse des données de la tomographie électrique réalisées sur le terrain. Elle permet une transformation plus précise des données de résistivité en terme de teneur en eau (une composante importante en hydrogéologie). Dans cette perspective, nous avons réalisé au laboratoire de la Chaire d'environnement et gestion de rejets miniers à l'École Polytechnique de Montréal des mesures électriques sur 2 types de stériles miniers issus de la halde à stériles Petit Pas. Il s'agit de stériles avec un fort pourcentage d'ilménite (appelés par la suite colonne passant 10 mm d'ilménite) et d'autres avec un fort pourcentage d'anorthosite (appelés par la suite colonne passant 10 mm d'anorthosite). Les paramètres mesurés sont la résistivité et la chargeabilité en utilisant différentes configurations d'électrodes. Les cas étudiés sont nombreux : mesures avec des fluides interstitiels de conductivités différentes ainsi que des mesures avec différents degrés de saturation.

5.2 Équipements utilisés

Nous avons adapté une colonne conçue au départ pour les mesures hydriques afin d'effectuer également les mesures électriques. La colonne en acrylique a une forme cylindrique avec un diamètre et une hauteur respectivement de 30 cm et 100 cm, l'épaisseur de la paroi est de l'ordre de 0,8 cm. Les électrodes sont insérées dans des trous traversant la paroi et le joint est rendu étanche à l'aide de silicone. Ces électrodes, d'une longueur d'environ 3 cm, sont conçues à partir d'une tige en acier inoxydable. Pour augmenter la sensibilité du dispositif de mesure aux variations de résistivité, nous avons installé également des électrodes le long d'une tige centrale (figure 5.1). Ces électrodes sont coupées sous forme de bagues à partir d'un tube d'acier inoxydable. Au total, 4 niveaux d'électrodes ont été installés dans la colonne. Les niveaux sont espacés de 17 cm. Chaque niveau comporte 4 électrodes collées aux

parois et une électrode placée au centre, fixée sur une tige en PVC. En plus des électrodes, la colonne comporte 4 valves de sortie d'eau que nous utilisons comme des piézomètres pour la mesure de la charge et du débit ainsi que 3 capteurs de pression en céramique afin de suivre le niveau des pressions interstitielles lors de l'essai de drainage. Afin de pouvoir bien fermer la colonne après le montage, un système de ressort de 13 cm de longueur avec un couvercle a été mis en place. De ce fait, la partie supérieure (environ 14 cm d'épaisseur) reste remplie d'eau ou d'air selon les cas étudiés. Les figures 5.1 et 5.2 montrent respectivement des photos et un schéma explicatif du montage utilisé ainsi que la numérotation des électrodes et les dispositifs utilisés dans les mesures.

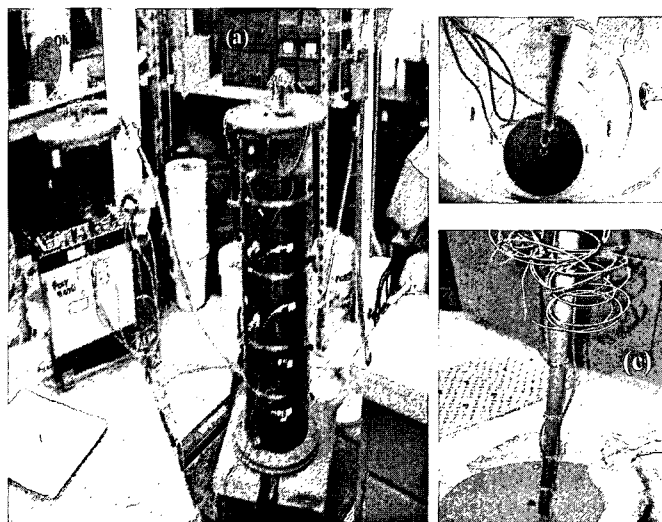


Figure 5.1 : (a) photo de la colonne après le montage, (b) vue de dessus de la colonne lors de la conception (c) photo de la tige centrale avec les électrodes circulaires

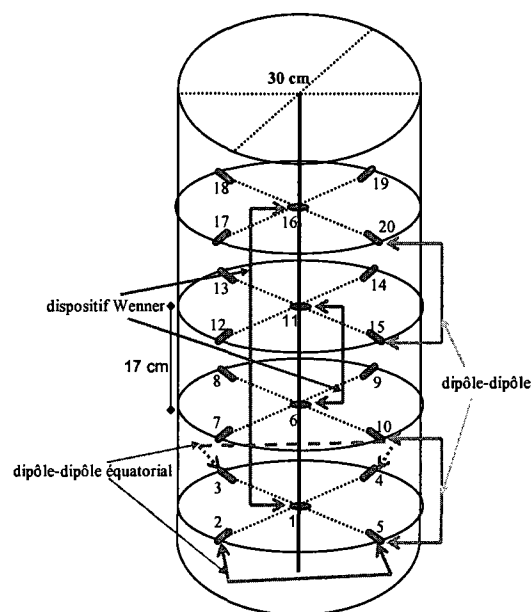


Figure 5.2 : Numérotation des électrodes utilisées dans les mesures avec une illustration des dispositifs adoptés pour les mesures

Une analyse du carbone et du soufre totaux a été effectuée avec l'appareil LECO par Manon Leduc au laboratoire de géochimie analytique (École Polytechnique de Montréal) sur les deux types de stériles pour le passant 4,75 mm broyés (pour avoir des particules inférieure à 80 μm). Le résultat est donné au tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Analyse des stériles utilisés dans les essais du laboratoire en matière du soufre et carbone totaux

Échantillon	Carbone total %			Soufre total %		
	Ech 1	Ech 2	Ech 3	Ech 1	Ech 2	Ech 3
Stérile à fort pourcentage d'anorthosite (3 échantillons) (matériau reçu en 2007, QIT2)	0,12%	0,09 %	0,07%	0,45%	0,30%	0,32%
Stérile à fort pourcentage d'ilménite (1 échantillon) (matériau reçu en 2006, QIT 1)	0,078%			0,431%		

De plus, des analyses minéralogiques en diffraction X ont été effectuées à l'UQAT par des étudiants de la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique UQAT sur des stériles miniers issus de la halde (le laboratoire de la Chaire à l'UQAT a reçu les mêmes stériles que le laboratoire à l'École Polytechnique de Montréal).

Le tableau 5.2 montre un exemple d'analyse minéralogique (DRX) pour six échantillons de stériles ayant différentes caractéristiques tel que décrit dans le tableau 3.1. L'échantillon étudié ici, dit anorthosite, correspond à des stériles frais (produits un mois avant l'emballage dans les barils) et leur minéralogie peut correspondre à une moyenne de celle de C1 et C2.

Le tableau 5.3 montre l'analyse minéralogique (DRX) de l'échantillon dit d'ilménite (l'information concernant l'âge et la taille est inconnue). On note également que le matériau utilisé dans le cas de la colonne dite d'ilménite a été déjà utilisé pour des essais hydriques au cours de l'été 2007. Il est possible que ses propriétés physiques et chimiques puissent être modifiées par rapport à celles de l'état original.

Tableau 5.2 : Résultats de l'analyse minéralogique, DRX, pour 6 échantillons de stériles d'anorthosite des fractions <6,3mm (matériau reçu en 2007) (tiré de Pepin, 2009)

Minéral	Formule chimique	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Labradorite	$(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$	44,58	19,08	15,95	32,24	31,26	20,33
Ilménite	FeTiO_3	22,98	36,97	45,23	23,16	26,86	41,20
Hématite	Fe_2O_3	8,13	9,30	20,05	7,91	8,64	16,49
Pyrite	FeS_2	1,34	3,00	1,58	1,12	1,26	1,65
Chalcopyrite	CuFeS_2	0,48	0,50	0,19	0,40	0,58	0,12
Enstatite	$\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	6,07	12,93	8,45	24,71	20,38	13,94
Pigeonite	$(\text{Mg},\text{Fe}^{++},\text{Ca})(\text{Mg},\text{Fe}^{++})\text{Si}_2\text{O}_6$	3,68	3,21	0,45	2,11	2,77	2,16
Biotite	$\text{K}(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_3(\text{Al},\text{Fe}^{3+})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	1,57	1,69	0,42	0,96	1,06	1,00
Muscovite	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	0,08	1,08	0,47	1,20	0,66	0,00
Chlorite	$(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_6(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	2,84	2,91	0,89	3,29	3,09	0,04
Orthoclase	KAlSi_3O_8	6,80	0,59	4,49	1,18	0,47	0,93
Rutile (anatase)	TiO_2	1,04	1,46	0,58	0,99	1,89	0,86

Tableau 5.3 : Résultats de l'analyse minéralogique, DRX, pour un échantillon des stériles d'ilménite (matériel reçu en 2006) (reçu de Pepin, 2008)

Minéral	Formule	TiO _{ch} (% p/p)
Labradorite	(Ca,Na)(Si,Al) ₄ O ₈	4,5
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	7,8
Biotite	K(Mg,Fe ²⁺) ₃ (Al,Fe ³⁺)Si ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂	1,5
Chlorite	(Mg,Fe,Al) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	5,5
Quartz	SiO ₂	0,2
Ilménite	FeTiO ₃	43,6
Hématite	Fe ₂ O ₃	21,1
Magnétite	Fe ²⁺ Fe ³⁺ ₂ O ₄	7,5
Rutile	TiO ₂	7,5
Pyrite	FeS ₂	0,8
Chalcopyrite	CuFeS ₂	n/d

n/d : non détecté

L'analyse des deux tableaux montre que la composition minéralogique est différente entre les deux types de stériles et au sein de l'anorthosite elle-même selon les nombreux échantillons analysés (tableau 5.2). On constate également que la concentration en ilménite pour la plupart des échantillons issus des stériles d'anorthosite est plus faible que pour les stériles dits d'ilménite. En général, le pourcentage des oxydes de fer (les plus conducteurs) est plus grand pour le cas de l'ilménite (72 %) que pour l'anorthosite (30 % à 56 %). On note aussi l'absence de la magnétite dans les stériles d'anorthosite alors qu'elle est présente avec un pourcentage assez important dans le cas d'ilménite (7.5 %). Ces résultats laissent supposer que la résistivité de l'anorthosite sera plus élevée que celle de l'ilménite pour le même degré de saturation en eau. En plus de l'étude minéralogique et l'analyse en carbone et soufre totaux, une analyse granulométrique du passant 10 mm a été effectuée pour les deux types de stériles (figure 5.3).

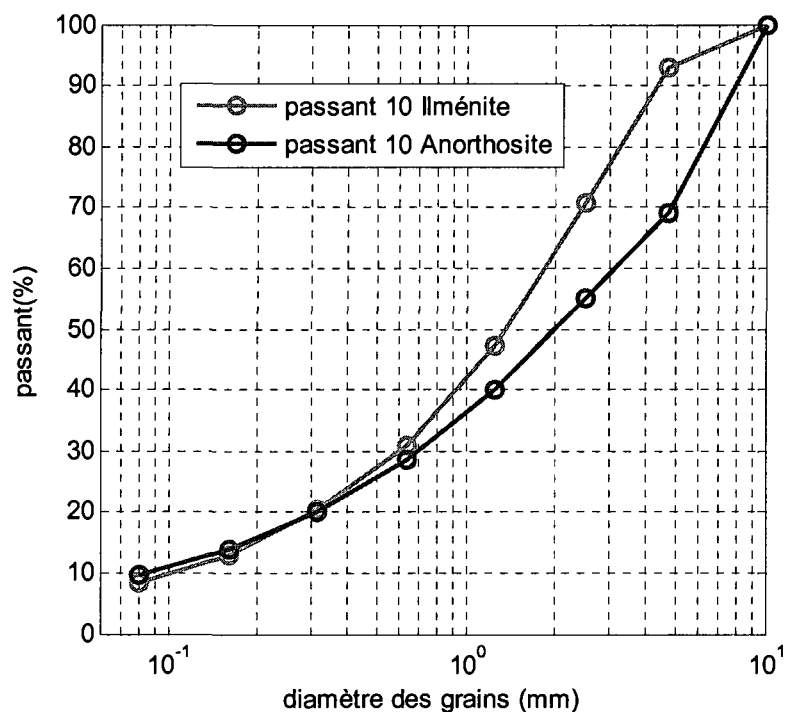


Figure 5.3 : Analyse granulométrique des stériles testés au laboratoire

L'analyse granulométrique des matériaux dans les colonnes montre que le D_{10} (0.09 mm) est presque le même pour les deux types de stériles, alors que le D_{60} pour l'ilménite ($D_{60}=1,9$ mm) est plus faible que celui de l'anorthosite ($D_{60}=3,2$ mm). Le coefficient d'uniformité, C_U , est de l'ordre de 21,1 pour l'ilménite et 35,6 pour l'anorthosite. Ceci indique que la colonne d'ilménite contient moins de particules grossières que celle d'anorthosite. Ces résultats laissent supposer que la capacité de rétention d'eau de l'ilménite serait plus grande que celle de l'anorthosite.

5.3 Détermination des facteurs géométriques du système de mesure

Afin de tester le système conçu, nous avons réalisé des mesures avec la colonne remplie d'eau distillée. La conductivité de l'eau mesurée à l'aide du conductivimètre (Accumet AP 85, Fisher Scientific) est de $4,43 \mu\text{S/cm}$ à une température de 24°C . D'après la relation 5.1, la résistivité de l'eau utilisée est de l'ordre de $2257,3 \Omega \cdot \text{m}$.

$$\text{résistivité } (\Omega.m) = \frac{10^4}{\text{conductivité } (\mu S / cm)} \quad (5.1)$$

Les mesures ont été effectuées avec trois configurations différentes. Il s'agit des dispositifs dipôle-dipôle, Wenner ainsi que le dipôle-dipôle équatorial (figure 5.2). Le résistivimètre SAS 4000 en mode standard a été utilisé pour réaliser les mesures. Les paramètres d'acquisition de la chargeabilité sont donnés ici à titre indicatif; une explication plus détaillée a été donnée aux chapitres 2 et 6.

Les paramètres d'acquisition des mesures sont :

- Durée de l'émission de courant : 2 secondes, durée d'un cycle : 8 secondes ;
- Délai entre le temps de coupure de courant et le temps de début des mesures, nous avons choisi un $\Delta t = 100$ ms afin d'éviter les problèmes d'induction EM dus à l'appareillage et au montage.
- Fenêtres de mesure, Δt_i : 100, 200 et 400 ms.

La chargeabilité globale, M_g , a été calculée à l'aide de la formule de la pondération temporelle (5.2).

$$M_g = \frac{\sum M_i \Delta t_i}{\sum \Delta t_i} \quad (5.2)$$

avec

Δt_i : Longueur de chacune des fenêtres de temps d'intégration;

M_i : Chargeabilité pour chacune des fenêtres temporelles Δt_i .

Le tableau 5.4 montre les résultats obtenus. Les électrodes C_1 , C_2 et P_1 , P_2 représentent respectivement les électrodes d'injection de courant et de mesure du potentiel.

L'analyse de ces données montre que leur qualité est bonne; l'écart-type est assez faible. Cependant, les résistivités sont très loin de la résistivité de l'eau mesurée à

l'aide du conductivimètre. Ainsi, les dispositifs dipôle-dipôle et Wenner du centre montrent respectivement des valeurs 18 fois plus petites et 3 fois plus grandes que la vraie résistivité, alors que les dispositifs dipôle-dipôle et Wenner du bord montrent respectivement des valeurs 1.6 fois plus petites et 3 fois plus grandes que la vraie valeur de l'eau. Le dispositif dipôle-dipôle équatorial montre une valeur 2 fois plus grande que la vraie résistivité.

La chargeabilité mesurée oscille entre 1,0 et 7,1 ms alors que l'eau a une chargeabilité nulle. Ces valeurs sont générées par le bruit électromagnétique du couplage entre les fils électrique de l'émetteur et du récepteur. Ces résultats indiquent que toute mesure de chargeabilité sur le matériau étudié qui est inférieure à 7 ms peut être causée par d'autres phénomènes que la polarisation du matériau.

Afin de comprendre l'origine de la différence entre les résistivités observées et la vraie résistivité de l'eau, un ensemble de mesures et de vérifications du système ont été conduites. Une modélisation avec le logiciel Comsol Multiphysics (figure 5.4 et tableau 5.5) a aussi montré que les valeurs de potentiel observées sont proches de ceux de la modélisation numériques et ceci pour la même géométrie et les mêmes courants injectés.

Tableau 5.4 : Résultats des mesures résistivité/chargeabilité, test avec de l'eau distillée d'une résistivité de 2257,3 $\Omega.m$.

dispositif dipôle-dipôle Électrodes interrogées : (électrodes du centre)	Résistivité équivalente au cas d'une mesure de surface ($\Omega.m$)	Courant injecté (mA)	Différence de potentiel mesurée (V)	Erreur sur lecture ($\Omega.m$)	Chargeabilité globale (ms)
(c1,c2)=(1,6)	124,38	10,00	-0,3831	0,70	2,8
(p1,p2)=(11,16)					
(c1,c2)=(16,11)	121,94	10,00	-0,3805	0,43	2,6
(p1,p2)=(6,1)					
dispositif Wenner Électrodes interrogées : (électrodes du centre)					
(c1,c2)=(1,16)	6137,02	5,00	28,727	0,16	3,0
(p1,p2)=(6,11)					
(c1,c2)=(6,11)	6082,32	10,00	56,9426	0,05	1,3
(p1,p2)=(1,16)					
dispositif dipôle-dipôle Électrodes interrogées : (électrodes du bord)					
(c1,c2)=(4,9)	1378,53	2,00	-0,8604	0,00	4,9
(p1,p2)=(14,19)					
(c1,c2)=(19,14)	1403,65	2,00	-0,8761	0,01	7,1
(p1,p2)=(9,4)					
(c1,c2)=(2,7)	1415,34	2,00	-0,8834	0,83	3,5
(p1,p2)=(12,17)					
(c1,c2)=(17,12)	1451,33	2,00	-0,9058	0,07	6,7
(p1,p2)=(7,2)					
dispositif Wenner : Électrodes Interrogées : (électrodes du bord)					
(c1,c2)=(19,4)	7063,07	2,00	13,2250	0,01	6,3
(p1,p2)=(14,9)					
(c1,c2)=(14,9)	7090,24	2,00	13,2758	0,88	6,8
(p1,p2)=(19,4)					
(c1,c2)=(17,2)	6960,79	2,00	13,0335	0,03	4,9
(p1,p2)=(12,7)					
(c1,c2)=(12,7)	6991,42	2,00	13,0908	0,88	4,7
(p1,p2)=(17,2)					

Tableau 5.4 : Résultats des mesures résistivité/chargeabilité, test avec de l'eau (suite et fin)

Dispositif équatorial dipôle- dipôle $a=b=20,56$ Electrodes Interrogées : (électrodes du bord)	Résistivité équivalente au cas d'une mesure de surface ($\Omega.m$)	Courant injecté (mA)	Différence de potentiel mesurée (V)	Erreur sur lecture ($\Omega.m$)	Chargeabilité globale (ms)
(c1,c2)=(18,19) (p1,p2)=(17,20)	4693,13	2,00	2,929	0,78	1,0
(c1,c2)=(13,14) (p1,p2)=(12,15)	4732,42	2,00	2,954	0,96	4,5
(c1,c2)=(8,9) (p1,p2)=(7,10)	4776,96	2,00	2,981	0,85	4,1
(c1,c2)=(7,10) (p1,p2)=(8,9)	4733,69	2,00	2,954	0,84	3,8
(c1,c2)=(3,4) (p1,p2)=(2,5)	5055,12	2,00	3,155	0,90	4,3
(c1,c2)=(2,5) (p1,p2)=(3,4)	5085,01	2,00	3,174	0,01	6,8

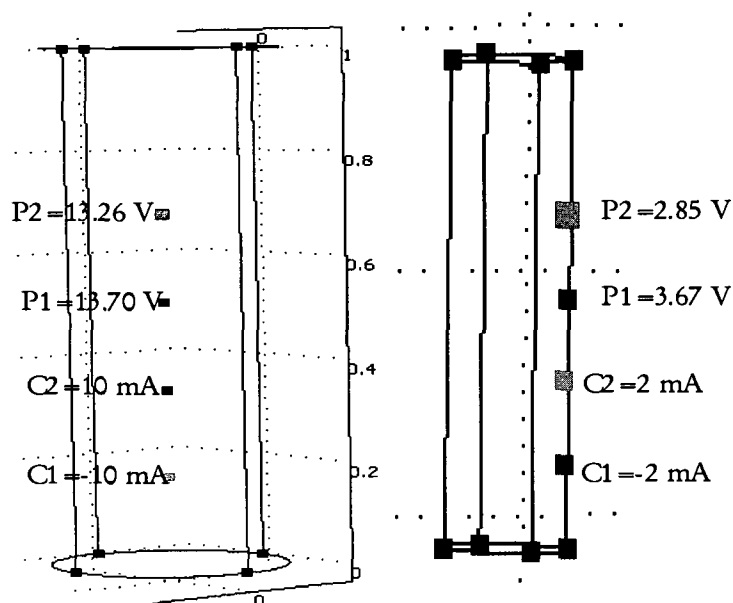


Figure 5.4 : Exemple de condition simulée avec le logiciel Comsol Multiphysics

Tableau 5.5 : Comparaison entre les potentiels mesurés et simulés pour les dispositifs utilisés : cas du test avec de l'eau distillée

Dispositif de mesure	Courant injecté (mA)		Potentiel simulé (V)		ΔV simulé (V)	ΔV mesuré (V)
	C1	C2	P1	P2		
dipôle-dipôle du centre	+10	-10	-15,251	-14.749	-0,502	-0.3815
Wenner du centre	+10	-10	39,244	-16,062	55.306	56.943
dipôle-dipôle du bord	+2	-2	-3,900	-2,964	-0,936	-0,881
Wenner du bord	+2	-2	4,82	-6,63	11,45	13,156
Équatorial dipôle-dipôle du bord	+2	-2	-1,5	1,1	2,6	3,025

Suite à ces simulations, il semble que les mesures sont précises mais les facteurs géométriques utilisés pour un demi-espace (cas des mesures de surface) ne sont plus valables pour une colonne. Cependant, connaissant la résistivité de l'eau, les potentiels mesurés et les courants injectés, on peut déduire les vraies valeurs du facteur géométrique, K , pour les dispositifs en colonne, à partir de la relation 5.3. Le tableau 5.6 montre une comparaison entre les facteurs géométriques pour un demi espace et ceux déduits à l'aide de l'essai avec de l'eau. Les facteurs géométriques déduits sont donnés en termes de valeur moyenne sur un ensemble de mesures directes et réciproques (en permutant les électrodes de courant et de potentiel). Les écarts-types ont été estimés par rapport aux nombres de mesures.

$$K = \frac{I \rho_{eau}}{\Delta V} \quad (5.3)$$

Tableau 5.6 : Comparaison entre les facteurs géométriques calculés et déduits à l'aide du test avec de l'eau

Dispositif de mesure	K (m) pour un demi espace $a=0.17$ m, $n=1$	K (m) déduit à l'aide de l'essai avec de l'eau	K (m) déduit à l'aide de l'essai avec Comsol
dipôle-dipôle du centre	-3,204	$-59,12 \pm 0,2$	-44,98
Wenner du centre	1,068	$0,39 \pm 0,00$	0,408
dipôle-dipôle du bord	-3,204	$-5,12 \pm 0,09$	-4.822
Wenner du bord	1,068	$0,34 \pm 0,00$	0.3484
Équatorial dipôle-dipôle du bord	4,55	$1,494 \pm 0,05$	1,535

Les facteurs géométriques utilisés par la suite pour la correction des résistivités mesurées sont ceux déduits de l'essai avec de l'eau. On note aussi que la résistivité de l'eau passe de $2257.3 \Omega.m$ (eau distillée) à $64.5 \Omega.m$ dès le passage à travers le matériau. L'explication possible de ce phénomène réside dans le chargement de l'eau en ions (dissolution) à travers le matériau induisant une chute de sa résistivité. Afin de comprendre l'origine de cette chute de résistivité, un échantillon ayant résidé 15 jours dans la colonne d'ilménite a été analysé au laboratoire de géochimie analytique de l'École Polytechnique de Montréal. Comme on ne peut pas faire un balayage de tous les éléments, l'analyse a été limitée aux 6 éléments qui sont les plus susceptibles d'être libérés par les stériles dans l'eau (tableau 5.7).

Tableau 5.7 : Comparaison des concentrations dans l'eau avant et après une résidence de 15 jours dans les stériles

Échantillon/ Concentration	Ni mg/L	Ca mg/L	Cu mg/L	Al mg/L	Ti mg/L	Fe mg/L
Eau distillée	< 0,01	0.18	< 0,01	< 0,1	X	< 0,01
Eau ayant résidé dans les stériles	0.02	114	0.02	< 0,1	< 1,0	< 0,01

D'après cette comparaison, il est évident que le calcium a été libéré d'une manière abondante tandis que la concentration des autres éléments est restée presque constante. Benoît Plante, étudiant en doctorat à l'UQAT, étudie la composition et le comportement géochimique des stériles issus de la même halde en utilisant des essais cinétiques (cellules humides Norme ASTM D5744-96). Pour cet objectif, il a monté (avec Geneviève Pepin) 6 cellules avec des stériles de différents âge et pourcentage en ilménite (tableau 5.8).

Tableau 5.8 : Caractéristiques des matériaux testés dans les cellules expérimentales de laboratoire (tiré de Plante, 2008)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Sample age	Freshly blasted	Freshly blasted	Freshly blasted	25 years	25 years	25 years
Ilmenite content	low	intermediate	high	low	intermediate	high
S (wt%)	0.384	0.345	0.472	0.142	0.164	0.172
Ni (wt%)	0.028	0.032	0.043	0.031	0.033	0.037

La procédure consiste à effectuer des cycles hebdomadaires de mouillage-séchage; le mouillage se fait à l'aide de l'eau distillée. À la fin de chaque cycle, l'eau est analysée pour déterminer la concentration des différents éléments.

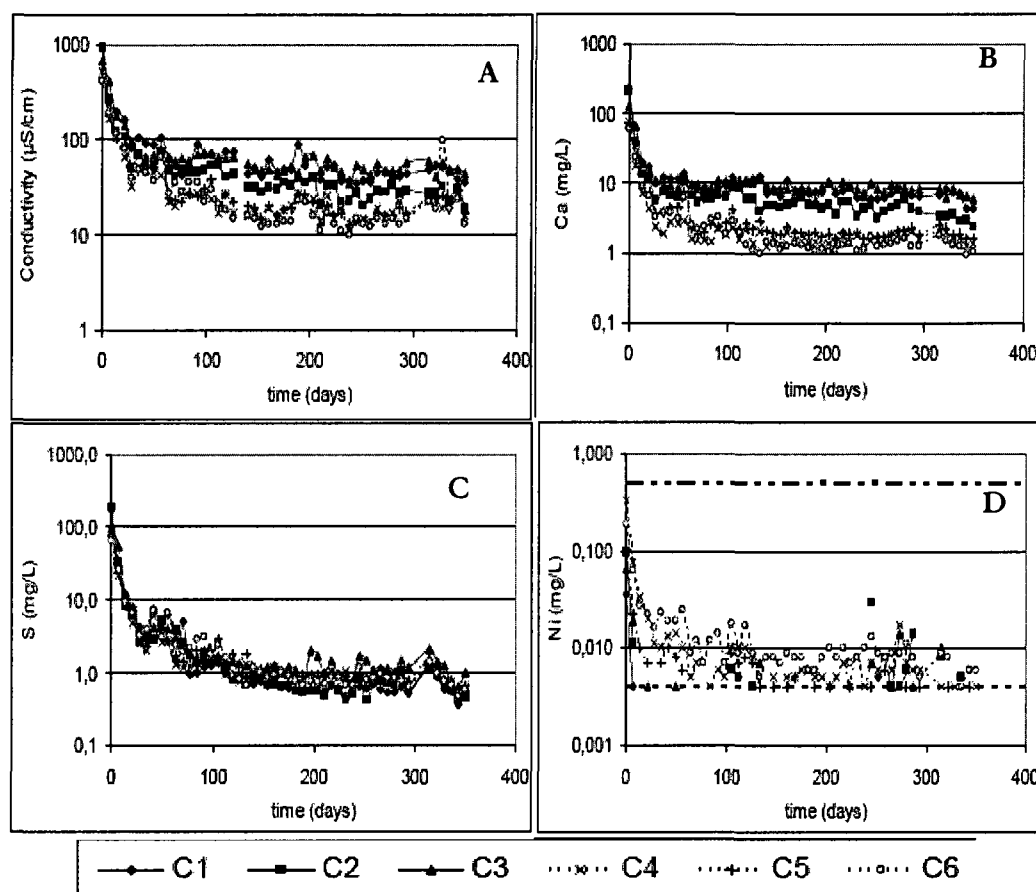


Figure 5.5 : Exemple de variation des paramètres mesurés en fonction du temps. A) Variation de la conductivité électrique, B) Variation de la concentration en calcium, C) Variation de la concentration en soufre, D) Variation de la concentration en nickel (adapté de Plante et al., 2008)

L'analyse des résultats de la figure 5.5 montre que pendant les premiers cycles de mesure, la conductivité électrique de l'eau est assez élevée pour tous les types de stériles étudiés. Après 8 cycles, elle se stabilise autour de 15 $\mu\text{S/cm}$ pour les stériles âgés avec une teneur élevée en ilménite et 70 $\mu\text{S/cm}$ pour les stériles récents avec un faible pourcentage d'ilménite. La valeur mesurée dans notre cas, soit 155 $\mu\text{S/cm}$, se situe dans l'intervalle de variation des premiers cycles de mesure. La même chose est observée pour la concentration en calcium et en soufre. En effet, la concentration

diminue avec le temps pour tous les types de stériles. On constate une bonne corrélation du comportement de la conductivité avec celle de la concentration en calcium et en soufre. Malheureusement, l'analyse du soufre dans l'eau n'a pas été réalisée dans notre cas. Cependant, la dissolution du calcium semble justifier en grande partie la chute de résistivité observée. La formule empirique de Fishman et Friedman (1989) permet d'estimer d'une manière simple la conductivité d'une solution aqueuse.

$$\sigma_w(S / m) = a.TDS(mg / l) \quad (5.4)$$

avec

a : Constante qui est de l'ordre de $1.5 \cdot 10^{-4}$;

TDS : Concentration totale de solides dissous.

En considérant les éléments du tableau 5.7, on trouve une résistivité de $57,9 \, \Omega.m$ qui est proche de celle mesurée à l'aide du conductivimètre ($64,5 \, \Omega.m$).

5.4 Mesure des propriétés électriques des stériles

La phase de préparation du matériau commence tout d'abord par la détermination des pourcentages en poids de chacune des fractions passantes (c'est-à-dire le matériau dont le diamètre est inférieur à 4,75 mm et celui entre 4,75 et 10 mm). Ensuite, les deux fractions sont humidifiées et bien mélangées puis laissées au repos pour une durée de 24 heures. La phase 2 consiste à placer le matériel préparé dans la colonne par couches d'environ 5 cm; chaque couche est compactée avec une énergie constante avant d'ajouter la suivante. Le tableau 5.9 donne les propriétés des deux types de matériau lors du montage.

Tableau 5.9 : Propriétés des deux matériaux lors du montage

	densité relative D_r	teneur en eau massique ω %	teneur en eau volumique moyenne θ_w	porosité moyennes ϕ	degré de saturation moyen S_r
anorthosite	3,698	1,64	0,045	0,25	18 %
ilménite	4,061	3,51	0,107	0,247	43,5 %

Après environ trois jours suivant le début du montage, des mesures de résistivité ont été réalisées avant de saturer la colonne avec de l'eau. Les résultats de ces mesures sont donnés respectivement à l'annexe 5.1 pour l'anorthosite et à l'annexe 5.2 pour l'ilménite. L'analyse de ces mesures montre que les données sont de bonne qualité, l'écart-type estimé sur 4 lectures étant inférieur à 1 %. Cependant, la résistivité observée varie en fonction du dispositif et de la position des mesures (centre ou le bord de la colonne). La résistivité mesurée à l'aide du dispositif dipôle-dipôle équatorial décroît du haut en bas de la colonne; ceci est probablement causé par une infiltration d'eau dans la colonne durant la période de repos. Après la mesure à l'état humide, plusieurs autres mesures ont été conduites pour des conditions différentes. Malheureusement, la présence des cailloux ne permet pas d'installer des sondes TDR pour la mesure de la distribution de la teneur en eau le long de la colonne. Cependant, en faisant des mesures de résistivité/chargeabilité après le drainage de la colonne suivi d'un démontage par couches, on peut déterminer la variation de la résistivité en fonction du degré de saturation (pour les différents niveaux) avec une bonne précision. Nous avons réalisés des mesures dans les cas suivants :

- ✓ Mesures sur stériles saturés ($S_r \sim 100\%$) avec de l'eau distillée du laboratoire, (cf annexe 5.3 pour l'anorthosite et annexe 5.4 pour l'ilménite);
- ✓ Mesure en saturant le matériau avec un fluide de résistivité $1.8 \Omega.m$, $S_r \sim 100\%$ (cf annexe 5.5, anorthosite;

- ✓ Mesure en saturant le matériau avec un fluide de résistivité de $17.25 \Omega.m$, Sr $\sim 100\%$ (cf. annexe 5.6, anorthosite);
- ✓ Mesure après le drainage final, (cf. annexe 5.7, anorthosite et annexe 5.8, ilménite).

Avant l'essai de drainage, nous avons tenu à laver le sol en faisant passer une quantité d'eau égale au moins 3 fois le volume des pores présents dans la colonne et ce dans le but de s'assurer que le sel a été bien éliminé (pour que nous puissions réutiliser le matériau pour d'autres essais). Le drainage a été effectué après une période de repos d'environ 5 jours. Le niveau de sortie d'eau a été gardé à environ 10 cm plus haut que la base de la colonne et ce dans le but d'obtenir la courbe de rétention d'eau en plus des mesures de résistivité électrique. Ainsi, après une période de drainage d'environ 15 jours où la quantité d'eau sortant de la colonne est devenue négligeable, nous avons procédé aux mesures de résistivité/chargeabilité. Après ces mesures, nous démontons la colonne par couche d'environ 5 cm. Le poids et le volume du matériau sont mesurés pour chacune des couches. Ensuite, le matériau de chaque couche est mis dans le four pour une durée de 24 heures. Ainsi, nous déterminons la porosité (ϕ), la teneur en eau (ω et θ) et le degré de saturation (S_r) le long de la colonne. La figure 5.7 montre la variation du degré de saturation en fonction de la hauteur de la colonne pour les deux types de stériles étudiés (suite au démontage par couches). Les données de démontage (ϕ , θ et S_r de chaque couche) pour les deux matériaux sont données aux annexes du chapitre 4.

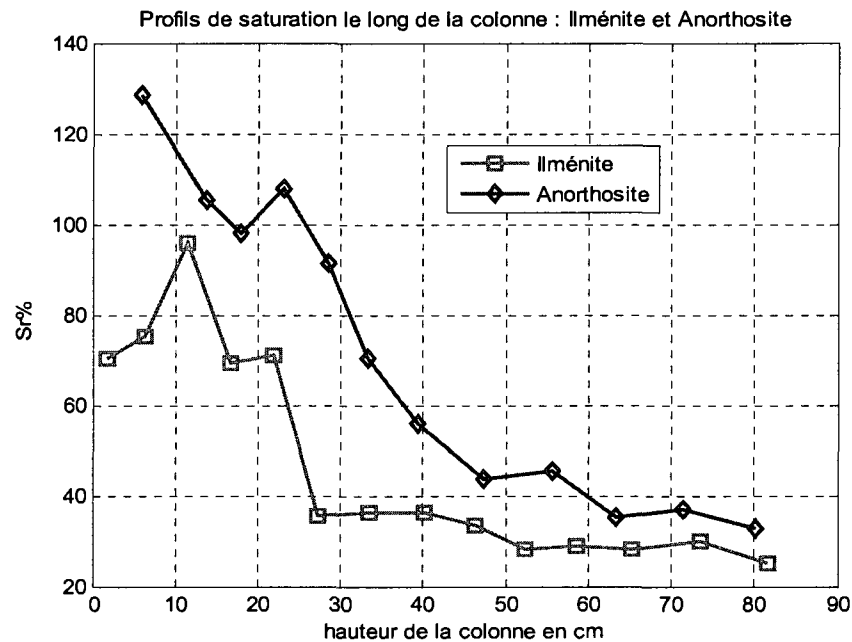


Figure 5.6 : Profils de saturation, pour les deux colonnes, obtenus à l'aide de la méthode de démontage par couche (passant 10 mm d'anorthosite et d'ilménite)

L'analyse de la figure 5.6 montre que les deux colonnes présentent deux profils de degré de saturation différents. On observe que la colonne d'anorthosite retient plus d'eau que celle d'ilménite, ce qui est contraire aux résultats prévus d'après les propriétés granulométriques. Cependant, il faut signaler que le démontage est une opération délicate surtout pour les couches les plus basses (plus saturées) où on assiste à une accumulation d'eau. Ce phénomène rend difficile l'attribution de l'eau à une couche précise. La mesure des épaisseurs des couches est aussi une importante source d'erreur influençant d'une manière significative le calcul de la porosité des couches. Ces constats expliquent en partie les degrés de saturation dépassant 100% pour le cas de l'anorthosite. Le démontage de la colonne d'ilménite a été effectué par un autre stagiaire (Bourrel, 2007), donc les erreurs relatives à la manipulation ne sont pas les mêmes. Le tableau 5.10 présente les degrés de saturation aux différents niveaux

d'électrodes pour les deux types de sol. Ces valeurs sont déduites des courbes présentées dans la figure 5.7 par extrapolation.

Tableau 5.10 : Degrés de saturation local pour les 4 niveaux d'électrodes

	S _r niveau 1 (17 cm)	S _r niveau 2 (34 cm)	S _r niveau 3 (51 cm)	S _r niveau 4 (68 cm)
Anorthosite	98 %	70 %	45 %	36 %
Ilménite	68 %	36 %	30 %	28 %

5.5 Étude de la résistivité en fonction du degré de saturation

En général, les matériaux sont composés d'une matrice de grains résistifs plus ou moins en contact entre eux selon le degré de compaction. La matrice des grains est plus ou moins saturée avec un fluide interstitiel de conductivité donnée. La nature et la quantité des ions présents dans le fluide interstitiel affectent sa conductivité électrique. Ainsi, la résistivité globale du matériau est étroitement liée à la conductivité des fluides interstitiels et à la nature des pores, c'est-à-dire le volume, la forme et l'interconnectivité. La formule d'Archie (1942) est la plus utilisée pour décrire la résistivité des matériaux sédimentaires en fonction de leurs paramètres hydriques :

$$\rho = a\phi^{-m}S_r^n\rho_w \quad (5.5)$$

où ρ est la résistivité apparente du matériau (en $\Omega.m$), ρ_w est la résistivité du fluide interstitiel (en $\Omega.m$), ϕ est la porosité (appelée aussi n dans le chapitre 4), S_r est le degré de saturation et a , m , n sont des constantes qui dépendent du type de matériau et varient généralement dans les intervalles suivants (Reynolds, 1997) :

$$0.5 \leq a \leq 2.5$$

$$1.3 \leq m \leq 2.5$$

$$n \approx 2$$

Le facteur (a) dépend de la lithologie, il est inférieur à 1 pour les roches à porosité intergranulaire et supérieur à 1 pour les roches à porosité de fractures). Le facteur de

cimentation (m) dépend de la forme des pores et de la compaction. Il varie entre 1,3 pour les sables non consolidés à 2,5 pour les calcaires cimentés (Chapellier, 2000). L'exposant n varie peu avec le type de la roche, sa valeur est environ 2 pour la majorité des roches ayant une porosité normale dont la teneur en eau est comprise entre 20 et 100 %. Dans le cas de notre matériau (stériles de roches dures), nous avons utilisé des valeurs qui correspondent au cas des roches détritiques faiblement cimentées (grés, sable) avec $a=0,88$, $m=1,37$ et $n=2$ (Keller, 1988).

La loi d'Archie est considérée valable pour les matériaux granulaires dont les grains sont électriquement très résistants. Les stériles étudiés dans notre cas sont plus complexes du fait de la teneur très élevée en minéraux métalliques (hémio-ilménite). La circulation du courant électrique dans ce cas pourrait être une combinaison de deux modes différents : une conduction ionique à travers l'électrolyte contenue dans les pores et une conduction électronique à travers les minéraux en contact. Pour l'instant, il n'existe pas de loi qui décrit ce genre de milieu en matière de réponse électrique globale. Le problème réside dans la difficulté d'évaluer la forme des grains, le mode d'agencement entre grains, les surfaces de contact, etc.

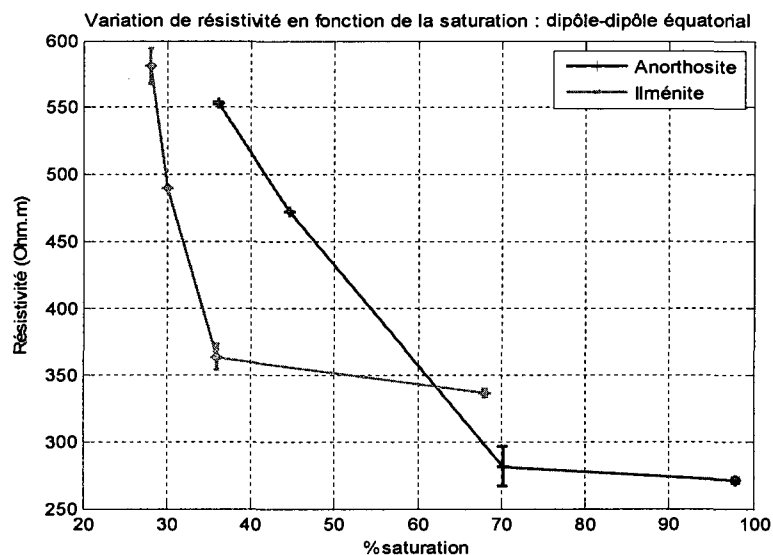


Figure 5.7 : Résistivité en fonction du degré de saturation pour les deux types de stériles (mesure après le drainage à l'aide du dispositif équatorial dipôle-dipôle horizontal aux 4 niveaux d'électrodes)

La figure 5.7 montre les résistivités mesurées à l'aide du dispositif dipôle-dipôle équatorial pour les 4 niveaux après le drainage. L'analyse de cette figure montre que la résistivité décroît en fonction de la saturation moyenne (mesurée à l'aide de la méthode de démontage par couches) pour les deux types de matériaux. On note également que la résistivité de l'anorthosite est plus grande que celle de l'ilménite pour une même plage de saturation sauf pour $S_r \geq 63\%$ où l'inverse se produit. Cependant, le manque des mesures pour des degrés de saturation plus grands que 70% dans le cas de l'ilménite ne permet pas de suivre le comportement pour les degrés de saturation élevés. D'une manière globale, les résultats pour les faibles degrés de saturation sont en accord avec les données de l'analyse minéralogique qui montre que les stériles d'ilménite contiennent plus d'oxyde de fer (moins résistifs) que ceux d'anorthosite (ce qui diminue la résistivité).

L'examen de la figure 5.8 montre que les résistivités déduites à l'aide de la loi d'Archie sont plus élevées (plus qu'un ordre de grandeur) que celles mesurées. Cette

différence est plus marquée pour les faibles degrés de saturation pour les deux types de matériaux. Ces résultats sont expliqués par le fait que la loi d'Archie ne prend pas en considération la conduction électronique dans les particules métalliques et à travers la surface de contact entre ces dernières. Cependant, Schön (1996) a proposé une modification de la loi d'Archie afin de prendre en considération le terme de conduction de surface pour le cas d'un matériau complètement saturé contenant une certaine proportion de granulométrie très fine (argile, silt).

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma_w}{F} + \sigma_{surface} \quad (5.6)$$

avec

σ_{eff} : conductivité effective du matériau;

σ_w : conductivité de l'eau (dans notre cas, elle est de 1.55×10^{-2} S/m);

$\sigma_{surface}$: conductivité de surface des grains;

$F = \phi^{-m}$: facteur de formation;

m : indice de cimentation, il varie entre 1.3 pour les graviers non consolidés à 2.5 pour les grés consolidés. Dans le cas des stériles, une valeur de 1.5 serait raisonnable;

ϕ : porosité, dans notre cas elle est de l'ordre de 0.25.

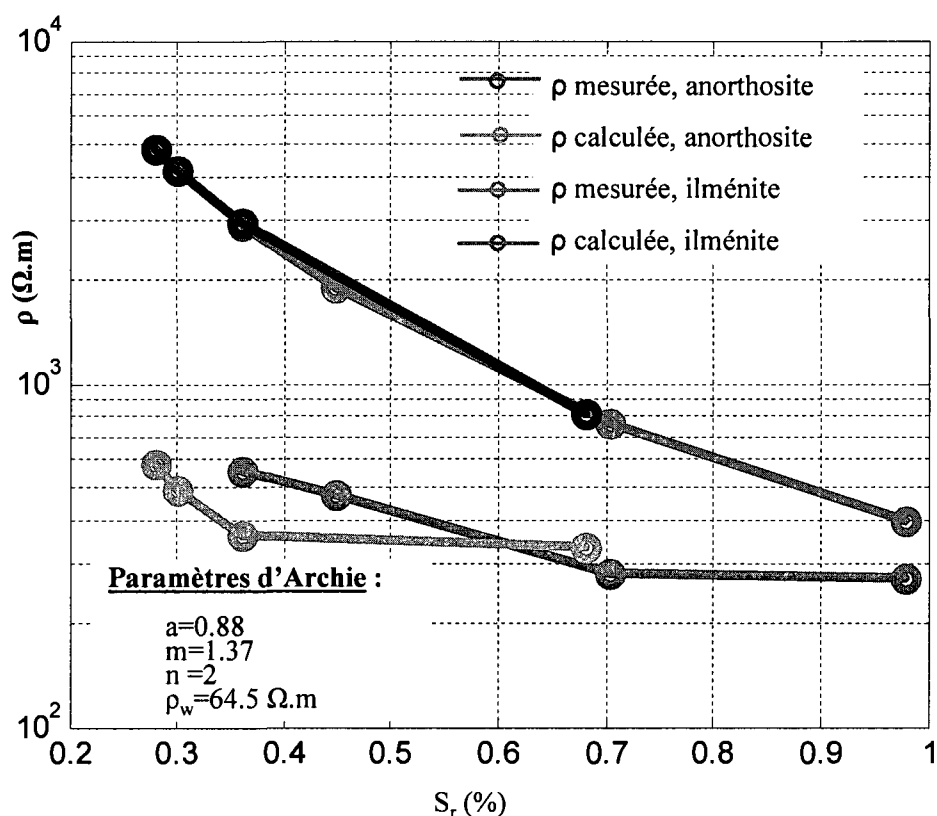


Figure 5.8 : Valeurs de résistivité observées et calculées à l'aide de la loi d'Archie (équation 5.5), pour les deux cas étudiés

Dans le cas de l'anorthosite, nous avons aussi réalisé des mesures avec des fluides de conductivité différentes, pour un degré de saturation $S_r=100\%$. En effet, nous avons préparé deux solutions avec des concentrations de sel différentes. Le matériau est ensuite saturé avec la solution préparée (en passant 3 fois le volume de pores) puis laissé au repos pour une durée d'environ 24 heures. Une fois les mesures faites, nous lavons bien le matériau (par lessivage) avant de le saturer avec la solution suivante. La figure 5.11 montre la variation de la conductivité du matériau en fonction de celle du liquide interstitiel pour les différents dispositifs de mesure.

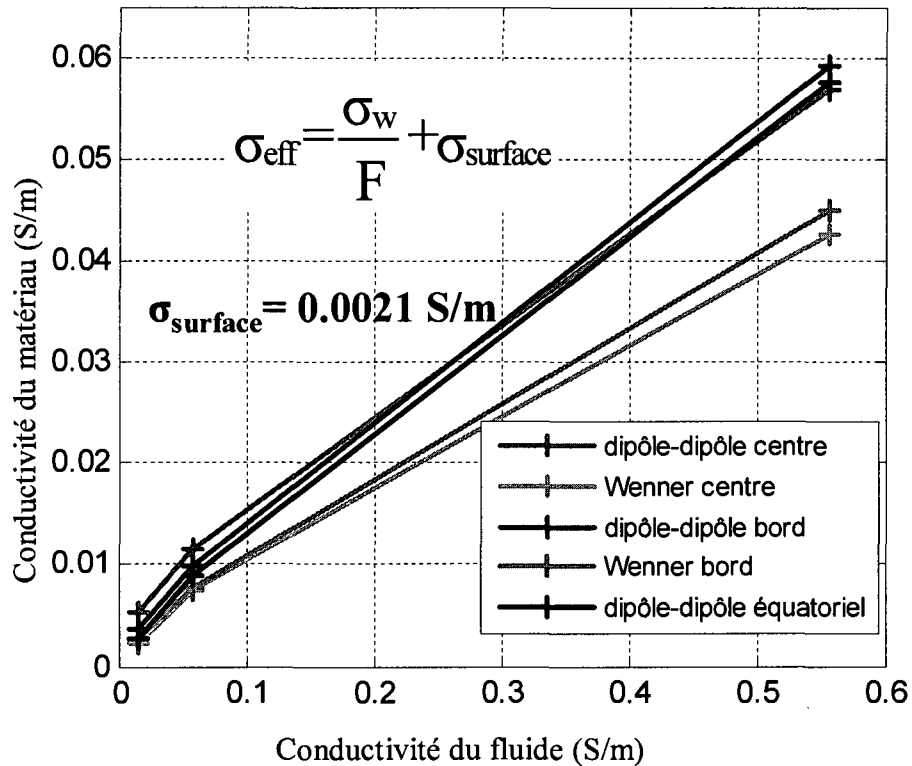


Figure 5.9 : Conductivité du matériau saturé en fonction de la conductivité du fluide interstitiel (mesures avec différents dispositifs)

L'analyse de la figure 5.9 montre que la conductivité croît presque linéairement avec la conductivité du fluide pour toutes les configurations et positions de mesure. Ces résultats indiquent que la résistivité des stériles dans les zones complètement saturées serait en étroite relation avec la quantité des ions solubles dans le fluide s'infiltrant à travers la halde.

En traçant les courbes de tendance pour les différentes droites, on peut estimer une conductivité de surface qui correspond à une valeur de σ_w nulle. Le tableau 5.11 montre les valeurs de la conductivité de surface estimée pour les différents dispositifs de mesure.

Tableau 5.11 : Valeurs estimées de la conductivité de surface

Dispositif de mesure	Conductivité de surface estimée (S/m)
dipôle-dipôle du centre	0,0049
Wenner du centre	0,0021
dipôle-dipôle du bord	0,003
Wenner du bord	0,0023
Équatorial dipôle-dipôle du bord	0,0021

Une valeur de 0.0021 S/m semble représentative et a été choisie pour analyser le comportement de résistivité en fonction du degré de saturation. Une fois que la conductivité de surface est estimée, nous utilisons la loi de Waxman et Smits (1968) qui prend en considération la variation du degré de saturation en même temps que les effets de surface.

$$\sigma_{eff} = \frac{S_r^d \sigma_w}{F} + S_r^{d-1} \sigma_{surface} \quad (5.7)$$

Le paramètre S_r représente le degré de saturation, d est un indice de l'ordre de 2; les autres paramètres sont définis dans la formule 5.6.

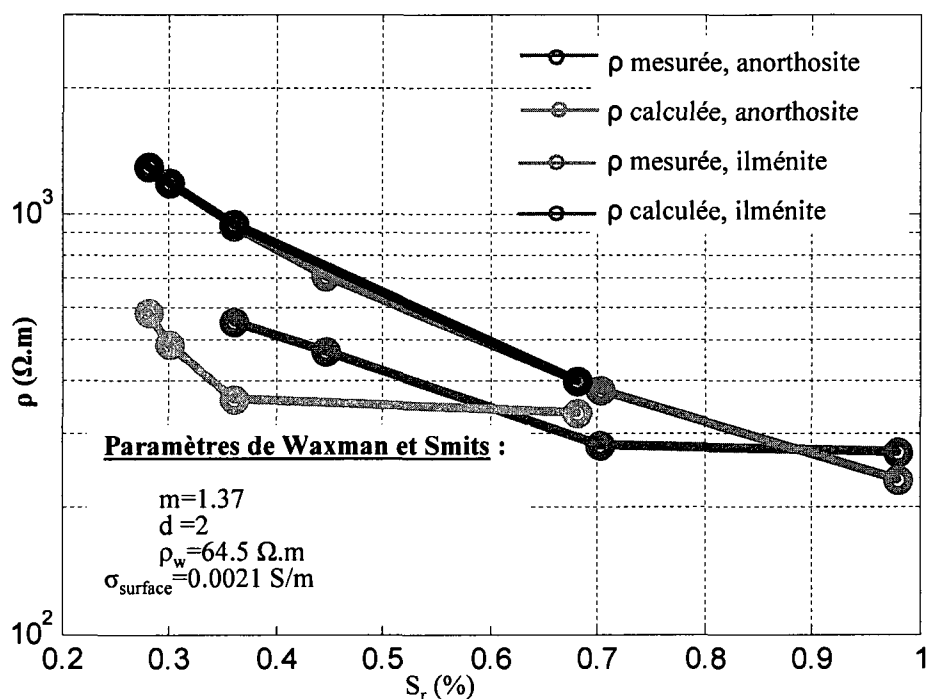


Figure 5.10 : Valeurs des mesures et valeurs déduites de la loi de Waxman et Smits (é.q. 5.7)

L'analyse de la figure 5.10 montre que les valeurs mesurées et calculées (loi de Waxman et Smits) présentent un écart assez élevé, particulièrement pour les faibles degrés de saturation. Ceci indique que la conductivité de surface déduite à l'aide de la loi de Schön serait une sous-évaluation de la vraie conductivité de surface dans les stériles. Néanmoins, il semble que la loi de Waxman et Smits est mieux adaptée que la loi d'Archie pour décrire le comportement de la résistivité en fonction du degré de saturation dans le cas des stériles de QIT.

La figure 5.11 montre l'évolution de la résistivité mesurée du matériau dans la colonne à l'état humide à l'aide du dispositif dipôle-dipôle équatorial (avant la 1^{ère} saturation). On constate que la résistivité décroît du haut vers le bas pour les deux types de matériaux. Ceci est expliqué par une augmentation du degré de saturation vers le bas provenant de l'accumulation d'eau dans les couches inférieures. On note

également que la résistivité de l'anorthosite est plus élevée que celle d'ilménite pour l'ensemble des niveaux. Ceci est expliqué en partie par le fait que le degré de saturation à l'état d'équilibre était plus élevé pour l'ilménite, $S_r=43\%$, que celui de l'anorthosite, $S_r=18\%$. On peut évoquer aussi la différence en taux de minéralisation puisque l'ilménite contient plus d'oxyde de fer que l'anorthosite.

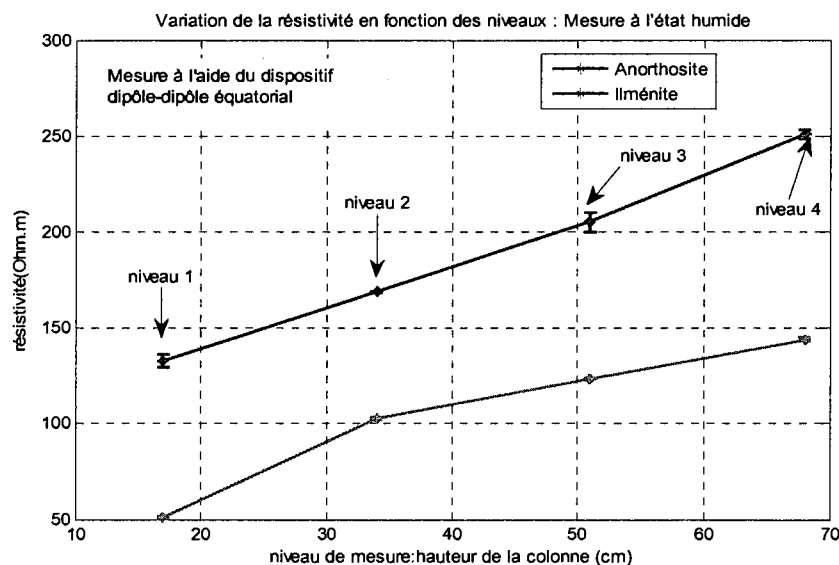


Figure 5.11 : Résistivité en fonction de la hauteur de la colonne, mesure 24 h après le montage par couche, mesure à l'aide du dispositif dipôle-dipôle équatorial

5.6 Étude de la chargeabilité en fonction du degré de saturation

La chargeabilité consiste en la mesure de l'effet de stockage des charges essentiellement électrochimique du matériau. Cet effet capacitif traduit la capacité d'un matériau poreux à stocker des charges électriques lorsqu'il est soumis au passage d'un courant électrique alternatif. La mesure peut se faire soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel. Plus de détail sur ce phénomène est donné au chapitre 2.

La figure 5.12 montre la variation de la chargeabilité en fonction du degré de saturation. L'analyse de cette figure montre que la chargeabilité décroît légèrement avec le degré de saturation. La chargeabilité est due principalement aux processus

électrochimiques qui se produisent à l'interface particules/électrolyte. L'augmentation du degré de saturation va pousser le passage du courant électrique à travers l'électrolyte contenu dans les pores plutôt qu'à travers les interfaces particules minérales/électrolyte. Ceci explique la diminution de la réponse PP en fonction du degré de saturation. La même chose se produit avec un électrolyte plus conducteur, où le courant électrique passe préférentiellement à travers l'électrolyte en court-circuitant le passage au niveau des interfaces. Ceci est constaté également lors des mesures réalisées au laboratoire avec des fluides de conductivité différente (figure 5.13). On constate également que la chargeabilité globale de l'anorthosite est plus grande que celle de l'ilménite pour l'ensemble des degrés de saturation. Ceci provient probablement dû fait que le matériau d'ilménite est plus minéralisé, donc l'eau interstitielle est plus chargée en ions que dans le cas de l'anorthosite. On rappelle aussi que le matériel d'ilménite a été utilisé pour la mesure des propriétés hydriques à l'été 2007, il a été passé au four à 105 °C ce qui a peut être induit un changement de ses propriétés physiques et chimiques.

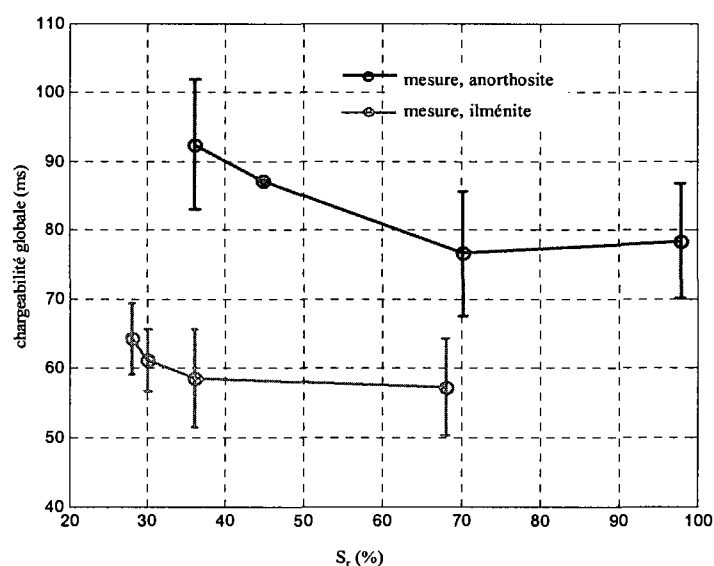


Figure 5.12 : Chargeabilité en fonction du degré de saturation pour les deux types de stériles (mesure après le drainage à l'aide du dispositif dipôle-dipôle équatorial)

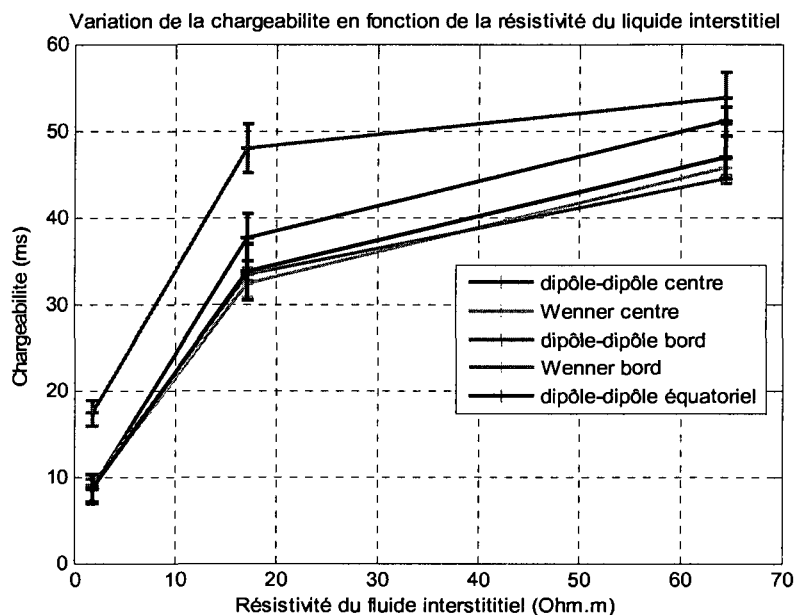


Figure 5.13 : Chargeabilité du matériau en fonction de la résistivité du fluide interstitiel mesure pour l'anorthosite

5.7 Mesures électriques sur des carottes de matériau issu de la mine

Pour étudier les propriétés électriques des stériles miniers en fonction des concentrations en particules métalliques (ilménite), nous avons réalisé des mesures au laboratoire sur des carottes de forage issues de la mine. Les 3 échantillons de carottes ont des pourcentages différents en ilménite (le pourcentage en ilménite a été déterminé par la mine). La figure 5.14 montre un schéma expliquant la méthode de mesures de la résistivité/chargeabilité dans le cas des carottes cylindriques.

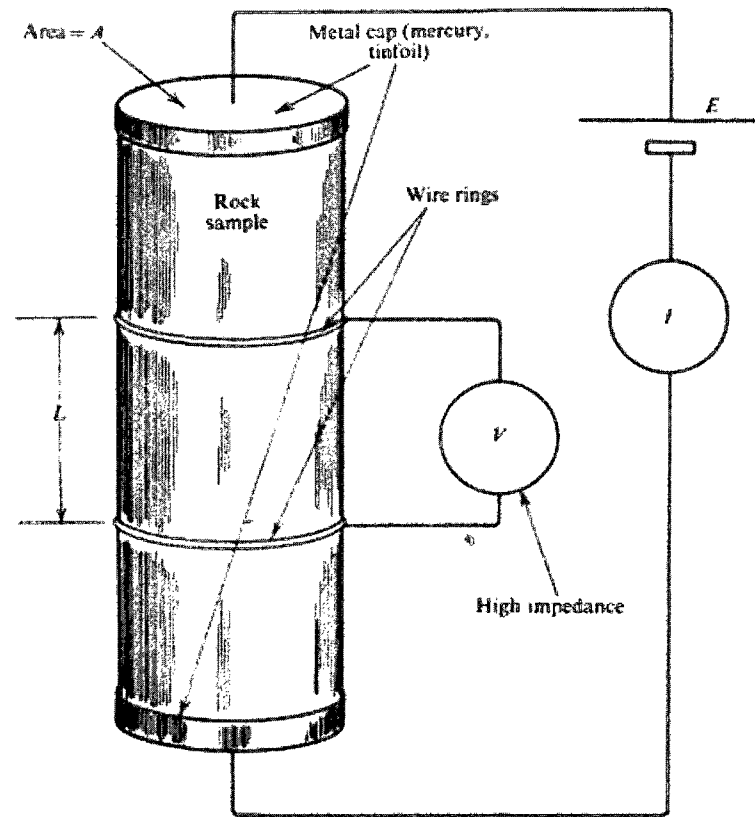


Figure 5.14 : Schéma explicatif de la méthode de mesure de la résistivité dans le cas des carottes (tiré de Telford et al, 1976)

Dans notre cas, le courant électrique est injecté à l'aide du résistivimètre SAS 4000 en mode standard aux bornes de la carotte. Les électrodes de courant sont composées de plaque en cuivre qu'on serre bien pour diminuer la résistance de contact avec le matériau (un gel conducteur est ajouté aussi entre les plaques et les sections des carottes). La mesure du potentiel se fait à l'aide des électrodes (fils en cuivre) enroulées au centre de la carotte. La résistivité d'une carotte est déduite à l'aide de la formule suivante (Telford et al, 1976) :

$$\rho = \frac{AV}{LI} \quad (5.10)$$

avec

A : section de la carotte (m^2);

V : différence de potentiel mesurée (V);

I : intensité du courant injecté (A);

L : distance entre les électrodes de potentiel (m).

Nous avons aussi réalisé pour ces échantillons des mesures de la susceptibilité magnétique, χ , à l'aide du susceptibilimètre K-2, EDA. Le tableau 5.12 montre l'ensemble de ces résultats.

Tableau 5.12 : Mesure des propriétés électriques des carottes issues de la mine

Échantillon	Courant injecté (A)	Potentiel mesuré (V)	(A/L) (m)	résistivité ($\Omega \cdot m$)	M_g (ms)	$\chi \times 10^{-2}$ SI
94.4% d'ilménite poids spécifique=4.72	0,002	0,0307	0,031	0,48	25,46	2,60
	0,002	0,0307	0,031	0,48	25,71	2,40
	0,005	0,0760	0,031	0,48	10,41	2,30
	0,005	0,0760	0,031	0,48	10,37	2,40
	0,01	0,1513	0,031	0,47	5,23	2,50
	0,01	0,1511	0,031	0,47	5,24	2,60
37% d'ilménite poids spécifique=3.24	0,005	18,9	0,044	165,9	20,28	0,95
	0,01	32,3	0,044	141,5	13,17	1,30
	0,01	32,3	0,044	141,6	13,44	0,87
	0,02	53,2	0,044	116,6	8,61	1,20
	0,02	53,2	0,044	116,5	8,47	1,10
	0,02	53,2	0,044	116,5	8,47	1,10
Stériles purs environ 0% d'ilménite poids spécifique=2.68	R estimé = $10^7 \Omega$	0,0186	$1,88 \cdot 10^5$		0,03 à 0,06	

Dans le cas des stériles purs, le résistivimètre n'a pas pu injecter du courant (même pour une faible valeur de 1 mA). Cela provient de la nature isolante des particules stériles (formés d'anorthosite). La résistance estimée à l'aide du multimètre (moins que 1 mA) est très élevée, plus de $10^5 \Omega$.

Pour les autres échantillons, la résistivité varie en fonction du pourcentage en ilménite, elle passe de 141 $\Omega \cdot m$ pour l'échantillon à 37 % d'ilménite à 0.5 $\Omega \cdot m$ pour l'échantillon à 94 % d'ilménite. L'échantillon à fort pourcentage d'ilménite agit comme un conducteur métallique. La chargeabilité globale est calculée à l'aide de l'équation 5.2. Pour une même valeur d'intensité de courant injecté, la chargeabilité est plus importante dans le cas de l'échantillon à 37% d'ilménite que celui à 94 %. L'augmentation de la concentration en ilménite diminue la quantité des charges stockées (le courant passe préférentiellement dans les particules d'ilménite en

contact). Lorsque la concentration en ilménite est moyenne, une partie de charge restent retenues entre les particules résistantes.

On note aussi que pour le même échantillon, la résistivité et la chargeabilité mesurées décroissent en augmentant le courant injecté. Ceci est probablement expliqué par un effet de potentiel spontané (PS). En effet, la résistivité est proportionnelle au rapport potentiel/courant. Cela indique que plus le potentiel généré est faible, plus l'effet du PS est important.

5.8 Discussion des résultats

L'étude des propriétés électriques des stériles au laboratoire a permis de mettre en évidence plusieurs de leurs caractéristiques. Tout d'abord, la chargeabilité est élevée (elle varie entre 50 ms à 100 ms). Cela indique que le taux de minéralisation et sa dissémination sont assez importants dans les stériles de la halde Petit Pas. Également, la chargeabilité croît rapidement en fonction de la résistivité du fluide interstitiel (elle passe de 25 ms pour une résistivité de fluide de 2 $\Omega.m$ à une chargeabilité de 50 ms pour une résistivité de fluide de 65 $\Omega.m$). On note aussi une légère diminution de la chargeabilité avec le degré de saturation. Pour les degrés de saturation élevés, le courant a tendance à passer préférentiellement à travers l'électrolyte plutôt qu'à travers les interfaces particules/ électrolyte, réduisant ainsi la réponse PP.

La résistivité croît presque linéairement avec la résistivité du fluide interstitiel. Cependant, sa variation en fonction du degré de saturation est assez complexe. La conductivité (inverse de la résistivité) globale du matériau peut être vue comme la somme de deux conductivités en parallèle. Il s'agit de la conductivité électrolytique et celle des particules métalliques. La conductivité des particules métalliques elle-même est la somme de deux parties en série, soit la conduction électronique dans les particules métalliques et celle à la surface entre particules. La conduction à travers les particules est difficile à quantifier et elle dépend essentiellement de la taille des particules, de la surface de contact ainsi que du mode d'agencement des grains. Dans

la littérature, il n'existe pas pour l'instant de modèles décrivant la variation de la résistivité en fonction de ces modes de conduction. La loi d'Archie qui est la plus utilisée pour décrire le comportement de la résistivité des matériaux en fonction du degré de saturation ne prend pas en considération la conduction entre particules métalliques. Elle conduit ainsi à une surévaluation de la résistivité, spécialement pour les faibles degrés de saturation. La loi de Schön et celle de Waxman et Smits, développées essentiellement pour le cas des argiles, ne semblent pas non plus être adéquates pour prédire le comportement de la résistivité en fonction de la saturation. Cependant, les écarts entre les mesures et les valeurs prédites à l'aide de la loi de Waxman et Smits sont plus faibles que ceux avec les valeurs déduites à l'aide de la loi d'Archie.

Chapitre 6 : Présentation des mesures géophysiques sur la halde

6.1 Introduction

Les mesures géophysiques ont été effectuées sur la halde Petit Pas au cours de l'été 2008. La morphologie de la surface de la halde montre une section plane et, vers l'ouest, des tas de stériles non compactés d'une hauteur de l'ordre de 2 à 4 m. On retrouve aussi des tas de stériles répartis par endroit, surtout vers les frontières de la halde. Vu la morphologie de la halde et la durée d'acquisition, les mesures ont été faites près de son axe central. Dans le cas des mesures électriques, les électrodes ont été implantées dans les zones les plus denses à l'aide d'une perforatrice électrique.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les appareils de mesure utilisés ainsi que les résultats bruts obtenus avec une analyse des erreurs. Le traitement et l'interprétation des données seront présentés au chapitre 7.

6.2 Dispositifs utilisés

6.2.1 Mesures électriques

Les mesures électriques ont été réalisées avec deux systèmes différents, le Lund Imaging System de ABEM Instrument et le Syscal Pro d'IRIS instruments.

- **Lund Imaging System**

Le Lund Imaging System, développé par la compagnie Suédoise ABEM Instrument, est composé de 3 parties. Il s'agit d'un appareil Résistivimètre "Terrameter SAS 4000" relié à un sélectionneur d'électrodes "ES-464" ou "Lund ES 1064". Le sélectionneur des électrodes est connecté aux électrodes implantées dans le sol via deux câbles (flûtes) possédant chacun 21 sorties. Le résistivimètre SAS 4000 permet à l'utilisateur de saisir les paramètres d'acquisition et de tester les connexions et la résistance de contact entre le matériau et les électrodes afin de les améliorer si requis

avant la prise des mesures. Le paramètre le plus important à contrôler est le mode d'injection de courant, qui est fonction de la qualité du contact entre le sol et les électrodes. En général, on utilise le mode automatique où on fixe la limite supérieure du courant injecté (avec un maximum de 1A); l'intensité diminue automatiquement lorsque l'appareil n'arrive pas à injecter le courant demandé. Le résistivimètre SAS 4000 permet également de sélectionner le dispositif de mesure (dipôle-dipôle, Schlumberger, etc) et l'espacement entre les électrodes. L'utilisateur peut aussi définir son propre protocole à l'aide d'un programme fourni avec l'appareil et le charger en mémoire via la liaison RS 232. Le résistivimètre prend un nombre de mesures (prédéfini par l'utilisateur) sur le même point et calcule l'écart-type. Si l'écart-type est inférieur à 1 %, il considère la valeur moyenne. Dans le cas contraire, il répète les cycles de mesure jusqu'à ce que le nombre maximum de cycles défini par l'utilisateur soit atteint.

En plus des mesures de résistivité, le résistivimètre peut également effectuer des mesures de la chargeabilité. Dans ce cas, il envoie dans le sol une onde de courant de forme carrée comme le montre la figure 6.1a. Pour chaque second quart de période, le courant est coupé brusquement pendant un quart de période pour être de nouveau injecté dans le sens opposé. La mesure de la chargeabilité s'effectue pendant l'arrêt de l'émission (figure 6.1b). Le sens du courant d'injection est inversé périodiquement pour connaître le zéro relatif du courant. La mesure de décroissance de la tension (chargeabilité), pendant l'arrêt de l'injection du courant, s'effectue par intégration de la tension sur un nombre de fenêtres temporelles définies au préalable par l'utilisateur. La durée des fenêtres d'intégration Δt_i est définie par la relation suivante :

$$\Delta t_i = b f^{i-1} \Delta t_0 \quad (6.1)$$

Avec

Δt_0 : intervalle de base en temps (millisecondes);

b : facteur de multiplication (valeur de 1 par défaut);

f : paramètre égal à 1 ou 2 respectivement pour des fenêtres avec des durées à progression arithmétiquement ou géométriquement;

i : numéro de la fenêtre d'intégration, avec un maximum de 10 fenêtres.

Pour la mesure de la chargeabilité, l'utilisateur doit définir également les paramètres suivants :

- durée d'injection de courant "Time on" en secondes (le quart de la période de l'onde du courant injectée);
- Délai (en millisecondes) entre le temps de la coupure du courant et le temps du début des mesures "Initial time delay". Ce délai permet d'éviter les problèmes d'induction EM provenant de l'appareillage et au montage;
- longueur de la première fenêtre temporelle (par défaut elle est de l'ordre de 100 ms).

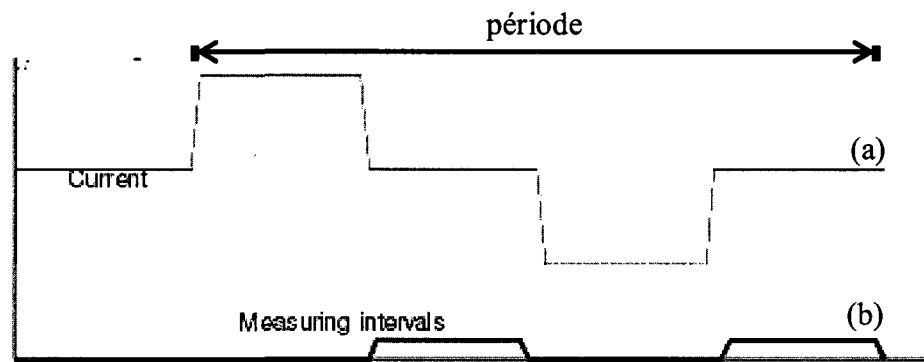


Figure 6.1 : (a) Schéma d'une onde de courant émise avec le résistivimètre (b) période de mesure de la chargeabilité.

▪ Syscal Pro 48 électrodes

Pour l'investigation en profondeur, nous avons utilisé le résistivimètre Syscal Pro de 48 électrodes avec un espacement de 10 m entre les électrodes. Ce système a été développé par la compagnie française IRIS Instrument. Pour les mesures de tomographie électrique, le résistivimètre Syscal Pro est relié à un sélectionneur

d'électrodes "Switch Pro". L'interrogation des électrodes se fait à travers 4 gros câbles de 120 m de longueur chacun. Le Syscal Pro est un outil puissant et rapide, il permet la prise de 10 mesures simultanément (10 dipôles de réception pour un dipôle d'injection). Il permet également d'injecter un courant de haute intensité, jusqu'à 2.5 A avec une puissance de 500 watt. L'alimentation se fait à l'aide de la batterie interne ou d'une batterie marine externe à décharge profonde (taux de décharge possible jusque 80 % et une bonne durée de vie). Ces caractéristiques permettent d'investiguer le sous-sol en grande profondeur avec plus de rapidité. Le courant injecté peut être automatiquement ajusté pour optimiser la différence de potentiel mesurée et s'assurer d'une bonne qualité de mesure, mais l'utilisateur peut aussi choisir d'injecter un courant spécifié. Le Syscal Pro possède un module qui permet la vérification des connexions des électrodes et la mesure de la résistance de contact entre le sol et les électrodes. Dans le cas des mesures simultanées de la résistivité et de la chargeabilité, les paramètres qui doivent être spécifiés sont presque les mêmes que dans le cas du système de l'ABEM. Pour nos mesures, les paramètres d'acquisition suivants ont été utilisés :

- dispositif: dipôle-dipôle;
- espacement : 10 m dans le cas de l'investigation en profondeur et 2 m pour l'étude de la proche surface;
- facteur de qualité exigé (écart-type) : 2%;
- nombre minimal de cycles "stack min" : 2;
- nombre maximal de cycles "stack max" : 10;
- nombre de niveaux (n) : Pour une séquence d'acquisition avec un écartement (a) entre électrodes (électrodes adjacentes), toutes les mesures effectuées avec le même espacement (n.a, distance dipôle émetteur-dipôle récepteur) correspondent à un niveau d'investigation (profondeur d'investigation). Lorsque n augmente, la profondeur d'investigation augmente aussi (plus de détail est donné dans le chapitre 2). Dans le cas de nos mesures, nous avons

utilisé 25 niveaux pour l'investigation en profondeur (n vari de 1 à 25) et 16 niveaux pour l'investigation en proche surface;

- durée de l'onde de courant (8s);
- différence entre le temps de coupure et le temps de début de mesure "M_{dly}" : 160 ms;
- fenêtres d'intégration : 4 chargeabilités partielles (M1, M2, M3 et M4) mesurées pour 4 fenêtres temporelles de durées respectives TM1=120 ms; TM2=220 ms; TM3=420 ms et TM4=820 ms.

La chargeabilité globale, M_g, est calculée dans le cas des mesures avec le Syscal Pro à l'aide de la formule suivante :

$$M_g = \frac{\sum_{i=1}^{i=m} (M_i TM_i)}{\sum_{i=1}^{i=m} TM_i} \text{ (mV/V)} \quad (6.2)$$

où M_i correspond aux chargeabilités partielles mesurées pour les fenêtres de temps TM_i et m est le nombre de fenêtres, dans ce cas m=4.

Les mesures effectuées à l'aide du Syscal sont transformées en millisecondes (pour des fins de corrélations avec les mesures au laboratoire). La transformation est réalisée en utilisant la relation suivante pour chacune des fenêtres temporelles (Δt_i) :

$$M_i(ms) = M_i(mV / V) \frac{\Delta t_i}{1000} \quad (6.3)$$

La chargeabilité globale, M_g, est recalculée à l'aide de la méthode de pondération temporelle donnée par la formule 6.2.

6.2.2 Dispositif de mesures au géoradar

Les mesures radar ont été réalisées à l'aide du système Mala, fabriqué par la compagnie suédoise Mala Geosciences. Ce système est composé d'une unité de contrôle appelée RAMAC/CU II qui est reliée aux antennes émettrice et réceptrice à l'aide des fibres optiques. L'unité de contrôle est connectée également à un PC qui

permet de fixer les paramètres d'acquisition et de réaliser la prise des mesures. Les antennes émettrice et réceptrice sont séparées par 1 m de distance et sont fixées avec les batteries et l'équipement à l'aide d'un cadre en bois. L'acquisition des données peut se faire par une personne, tel que schématisé à la figure 6.2.

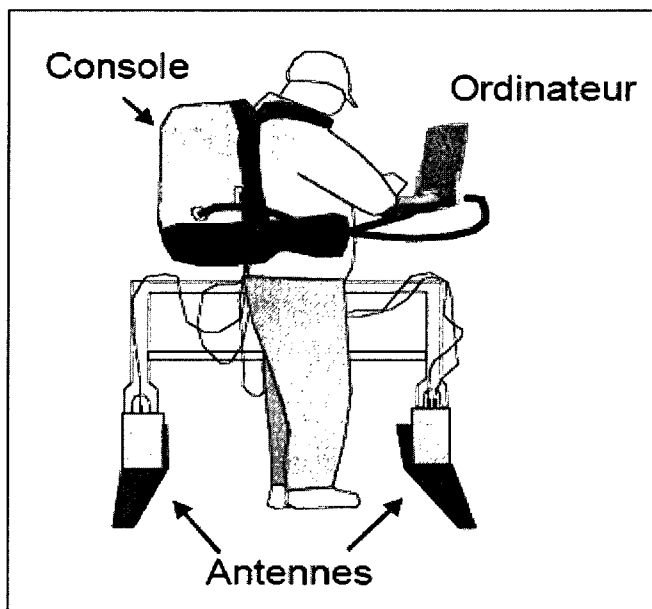


Figure 6.2 : Principales composantes du système RAMAC (tiré de Campos, 2004)

6.2.3 Dispositif de mesure pour la méthode EM transitoire (TDEM)

Les mesures transitoires ont été réalisées à l'aide d'un transmetteur TEM-47 et d'un récepteur numérique, Protem D. Les deux appareils sont fabriqués par la compagnie canadienne Geonics Limited située à Mississauga, Ontario. La figure 6.3 montre les principales composantes du système d'acquisition des sondages TDEM. L'émetteur TEM-47 permet une coupure rapide du courant ("Turn-off-time" court), ce qui favorise une investigation de haute résolution à faible profondeur. La synchronisation du TEM-47 avec le récepteur se fait à l'aide d'un câble de référence.

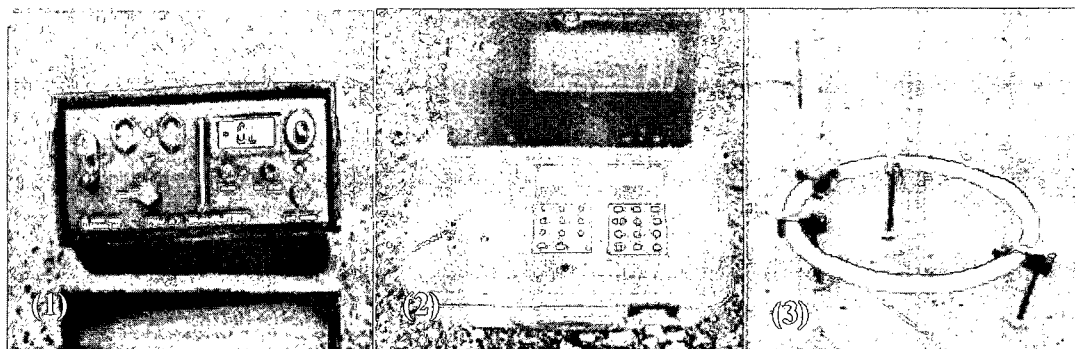


Figure 6.3: Principales composantes du système TDEM Geonics - (1) émetteur TEM47 - (2) récepteur Protem - (3) boucle de réception d'une surface équivalente de 31.4 m^2 (adaptée du manuel de Geonics, Protem-47D)

Le champ magnétique secondaire est détecté par la boucle réceptrice et échantillonné sur 20 fenêtres étalées entre la coupure du courant et le début de la prochaine impulsion. La durée de chacune de ces fenêtres augmente avec une progression logarithmique. Elles sont très étroites au départ (variation rapide du signal) et plus large à la fin (variation plus lente). Le tableau 6.1 montre les fenêtres d'intégration du signal enregistré pour les deux bases de fréquence d'acquisition utilisées soit 285 Hz et 75 Hz.

Tableau 6.1 : Fenêtres d'intégration pour les taux de répétition 285 Hz et 75 Hz (tiré du manuel de Geonics, Protém-47D)

numéros des fenêtres	fenêtres pour la fréquence 285 Hz			fenêtres pour la fréquence 75 Hz		
	début (μ s)	centre (μ s)	durée (μ s)	début (μ s)	centre (μ s)	durée (μ s)
1	6,00	6,813	1,625	32,00	35,25	6,5
2	7,625	8,688	2,125	38,50	42,75	8,5
3	9,75	11,13	2,750	47,00	52,50	11,00
4	12,50	14,19	3,375	58,00	64,75	13,50
5	15,88	18,07	4,375	71,50	80,25	17,50
6	20,25	23,06	5,625	89,00	100,3	22,50
7	25,88	29,44	7,125	111,5	125,8	28,50
8	33,00	37,56	9,125	140,0	158,3	36,50
9	42,13	47,94	11,63	176,5	199,8	46,50
10	53,75	61,13	14,75	223,0	252,5	59,00
11	68,50	77,94	18,88	282,0	319,8	75,50
12	87,38	99,38	24,00	357,5	405,5	96,00
13	111,4	126,7	30,63	453,5	514,8	122,5
14	151,7	166,4	29,38	576,0	654,3	156,5
15	181,1	206,0	49,88	732,5	832,3	199,5
16	131,0	262,8	63,63	932,0	1059	254,5
17	294,6	335,2	81,25	1187	1349	325,0
18	375,9	427,7	103,6	1512	1719	414,5
19	479,5	545,6	132,1	1926	2190	528,5
20	611,6	695,9	168,5	2455	2792	674,0

6.3 Mesures électriques

6.3.1 Investigation en proche surface

L'étude de la structure en proche surface de la halde est intéressante pour deux raisons. Tout d'abord ces couches de la proche surface contrôlent l'infiltration des eaux de pluie, de la neige fondante ainsi que de ruissellement. De plus, on présume que la méthode de construction de la halde a été la même depuis le début. Ceci laisse supposer que les couches en profondeur sont des répétitions de celles en proche surface, avec une différence en termes d'altération et de compaction. De ce fait, la reconnaissance de la structure de la proche surface permet de construire un modèle approché de la halde. Pour cette raison, nous avons réalisé 9 profils répartis sur deux zones (durant la 3^{ème} semaine de mesure, du 4/08/08 au 8/08/08). Au niveau de la zone I, nous avons réalisé 5 profils PP d'une longueur de 94 m avec un espacement entre profils de 6 m. Nous avons effectué également quelques sondages TDEM (durant la 2^{ème} semaine de mesure soit du 07/07/09 au 11/07/09) et des profils radar (1^{ère} semaine de mesure, 9 à 13 juin 2008) sur cette zone. En plus des mesures géophysiques, un bassin a été installé pour la mesure du taux d'infiltration in situ et une tranchée d'observation a été creusée au niveau de la zone I. Au niveau de la zone II, nous avons réalisé 4 profils PP d'une longueur de 142 m. Deux tranchées d'observation ont été creusées et deux bassins d'infiltration ont été installés. La profondeur d'investigation des levés PP est de l'ordre de 8 m. La figure 6.4 montre le plan de localisation de l'ensemble des travaux effectuée sur la halde en 2008. Les dénominations des levés, utilisées par la suite dans le mémoire, sont données dans les figures 6.5 et 6.11, respectivement pour les cas de l'investigation en proche surface et en profondeur.

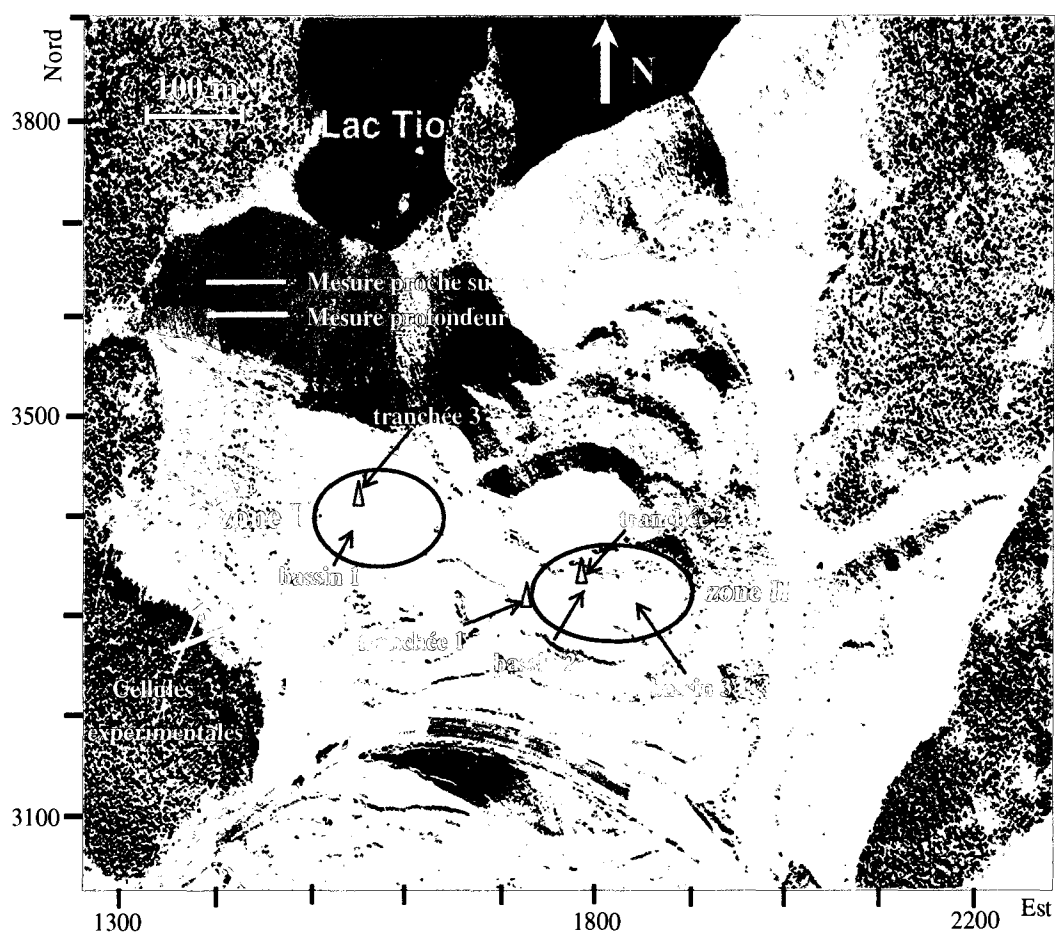


Figure 6.4 : Plan de localisation des travaux effectués sur la halde Petit Pas en 2008

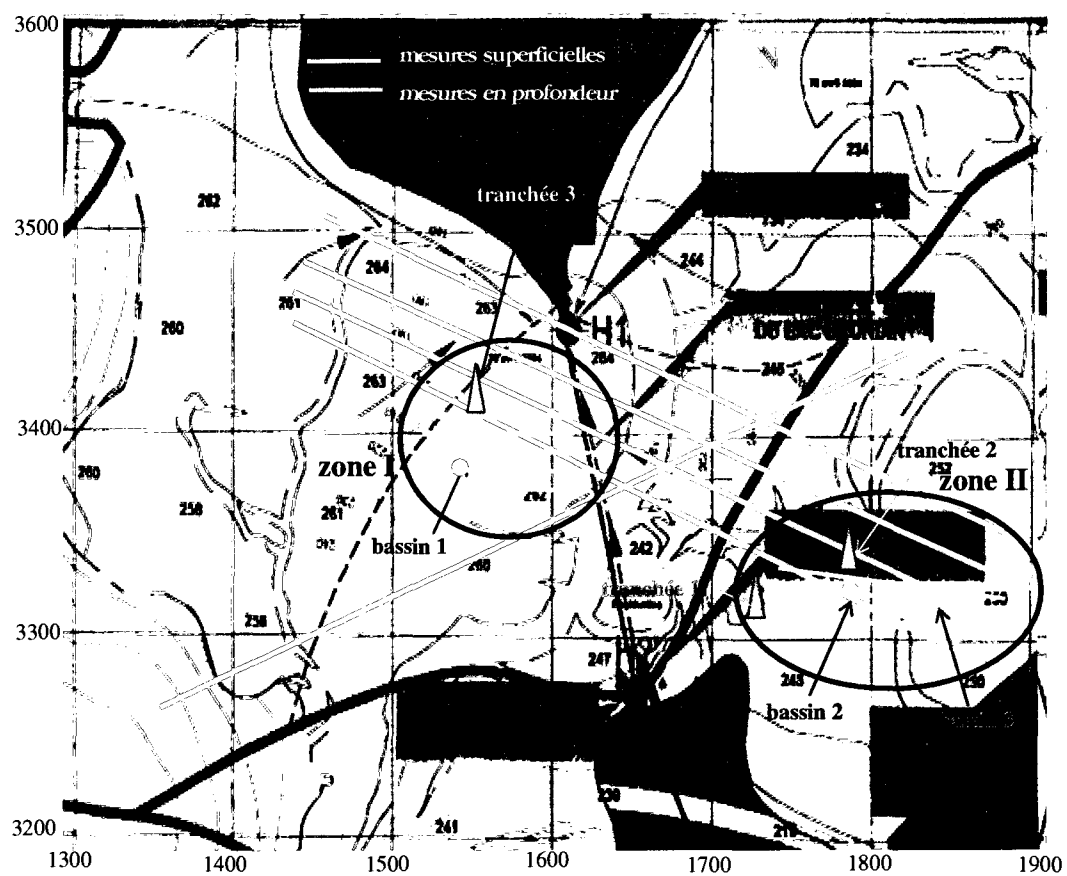


Figure 6.5 : Vue des zones de travaux effectués sur la halde Petit Pas en 2008

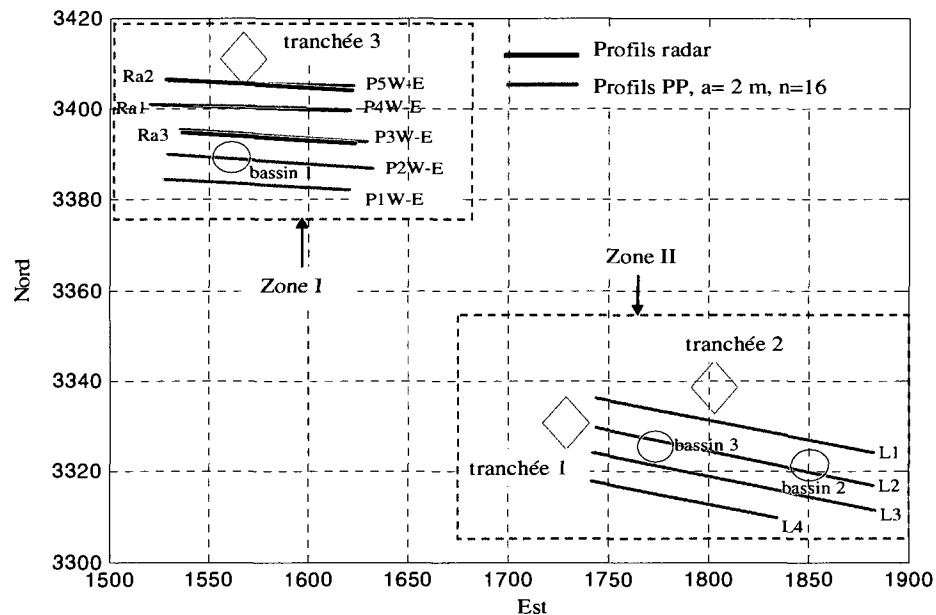


Figure 6.6 : Plan des levés superficiels, montrés sur la figure 6.5, avec leur dénomination

Dans un premier temps, une analyse des erreurs de mesure est effectuée sur les données afin d'évaluer la fiabilité des mesures et de supprimer les données qui présentent un écart-type trop élevé par rapport à la moyenne. Les résistivimètres Syscal Pro et le SAS 4000 évaluent la résistivité apparente en un point 4 fois au minimum, et ils calculent en même temps l'écart-type. Si cet écart-type est inférieur à la valeur fixée par l'opérateur, l'appareil enregistre la valeur moyenne avec son écart-type et passe à la mesure suivante. Dans le cas contraire, l'appareil continue de prendre la même mesure jusqu'à ce que l'écart-type soit inférieur à la valeur fixée ou bien que le nombre maximal de mesures fixé par l'utilisateur soit atteint. Les figures 6.6, 6.7, 6.8 et 6.9 montrent respectivement les pseudo-sections de résistivité/chargeabilité pour les deux zones, I et II.

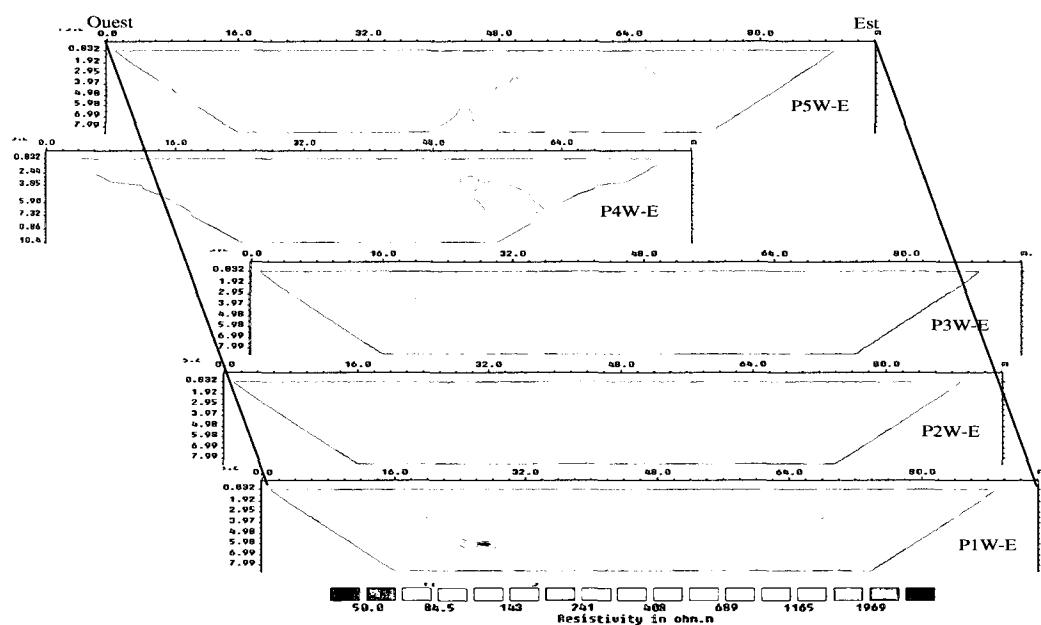


Figure 6.7: Pseudo-sections des mesures de résistivité apparente, zone I

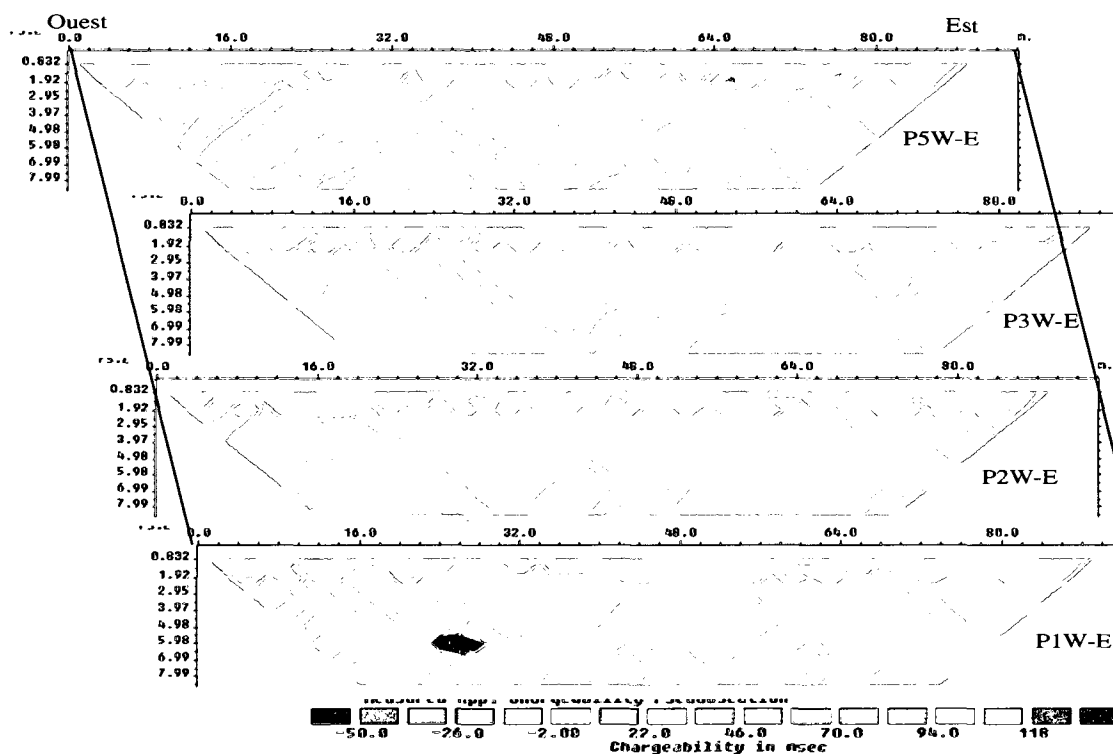


Figure 6.8: Pseudo-sections des mesures de chargeabilité apparente, zone I

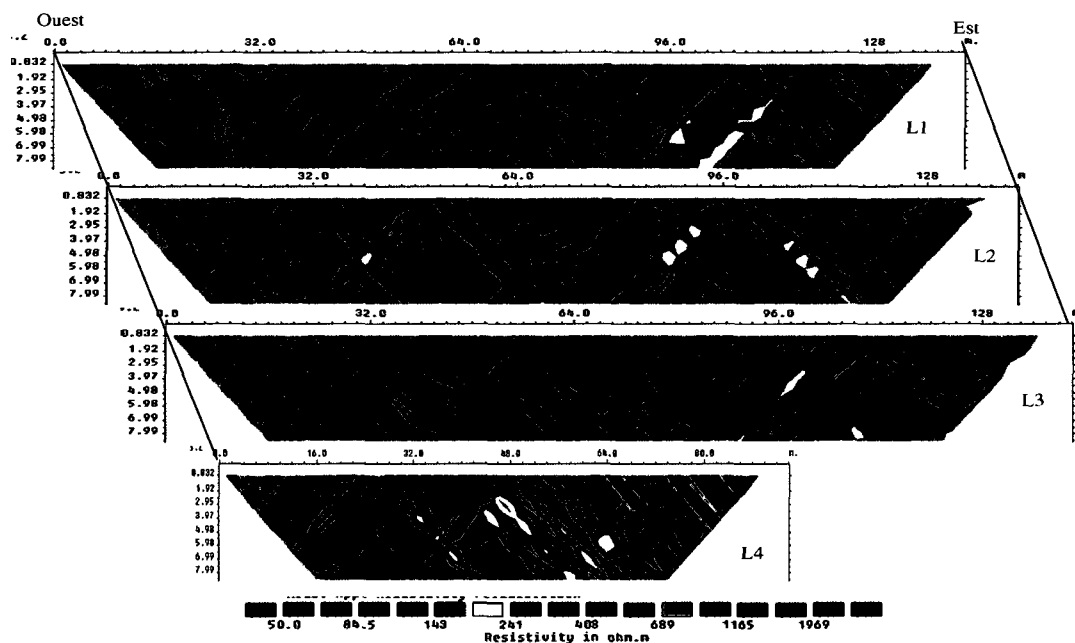


Figure 6.9 : Pseudo-sections des mesures de résistivité apparentes, zone II

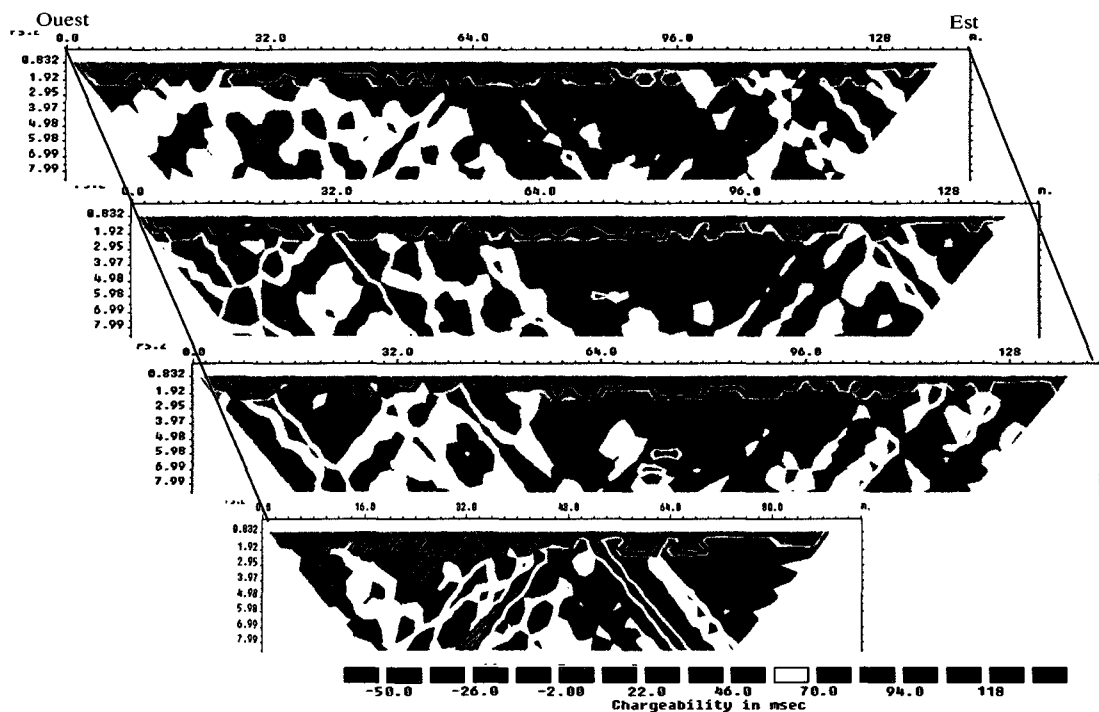


Figure 6.10: Pseudo-sections des mesures de chargeabilité apparentes, zone II

L'analyse des pseudo-sections montre que les mesures sont très affectées par les changements brutaux de résistivité en proche surface; une explication détaillée sur ce phénomène est donnée dans le paragraphe 6.3.2. Ces effets sont absents dans le cas du profil réalisé avec le SAS 4000. Le profil L4 (figure 6.9), sur le coté est, montre des résistivités très faibles avec des écarts-types importants et des différences de potentiel nulles aux bornes des dipôles d'émission ($V_{ab}=0$). La mesure de ce profil a été réalisée à la fin de la journée. Cela pourrait indiquer que ce problème est lié à la décharge de la batterie. Ces lectures sont jugées erronées (dues à l'appareillage) et seront supprimées avant l'inversion des données. Le tableau 6.2 présente une analyse des erreurs, effectuée à partir des fichiers de mesure (levés superficiels). Nous présentons pour chaque levé PP, l'erreur minimale, maximale et moyenne de toutes les mesures. L'analyse des fichiers de mesure montre que l'écart type est faible (moins que 1 %) pour les faibles distances entre le dipôle d'injection de courant et celui de la mesure du potentiel; plus cette distance augmente plus l'écart type devient important. Les mesures effectuées sur les zones meubles ou bien celles où il s'est produit un problème d'alimentation montrent également des erreurs importantes.

Tableau 6.2 : Analyse des erreurs de mesure de la résistivité/PP, dans le cas des mesures en proche surface

Profils	Écart-type minimum mesuré (%)	Écart-type maximum mesuré (%)	Moyenne des Écarts-type (%)	Nombre de lectures
P1W-E	0,0	61,2	2,5	600
P2W-E	0,1	65,8	1,6	600
P3W-E	0,0	60,7	1,0	600
P4W-E	0,3	77,0	3,0	356
P5W-E	0,1	89,5	2,1	600
L1	0,1	68,8	0,9	1200
L2	0,0	69,7	1,4	1200
L3	0,1	60,5	2,0	1200
L4	0,1	345,3	0,1	600

6.3.2 Effets des perturbations locales sur les mesures électriques

On appelle « à-coups de prise » la variation de résistivité plus au moins brutale que l'on note au passage d'une électrode de courant ou de potentiel au dessus ou près d'une surface de discontinuité électrique. L'influence de ce phénomène dépend du dispositif de mesure et de la méthode d'acquisition des données (Ritz et al., 1999). Au niveau d'une pseudo-section, l'effet des hétérogénéités peut s'étendre au delà de leur positions et peuvent ainsi perturber ou masquer les effets liés à des structures profondes ou d'intérêt particulier (Ritz et al., 1999). Les distorsions causées par les inhomogénéités peuvent être divisées en deux groupes. Les effets P et C qui sont dus respectivement au passage des électrodes de potentiel et du courant près ou au dessus d'une inhomogénéité locale. En terme d'altération, les effets P se manifestent au niveau des sondages électriques par un décalage vers le bas ou vers le haut de la courbe de résistivité, tandis que les effets C changent la forme de la courbe (Ritz et al., 1999). Afin de comprendre l'effet de ce phénomène sur les modèles d'inversion, nous avons réalisé une modélisation en considérant un modèle composé de 2 couches. La première couche a une résistivité de 400 $\Omega.m$ et une épaisseur de 3 m, suivie d'une 2^{ème} couche de résistivité de 1200 $\Omega.m$. Ensuite, nous avons inséré dans ce modèle des blocs conducteurs d'une résistivité de 85 $\Omega.m$ avec différentes tailles et profondeurs (figure 6.11a). Le dispositif dipôle-dipôle avec un espacement de 2 m entre électrodes est utilisé pour le calcul de la pseudo-section (figure 6.11b). L'analyse de la figure 6.11 montre que la pseudo-section de résistivité apparente calculée est affectée par la présence des blocs perturbateurs. La comparaison des sections issues de l'inversion montre que l'interface entre les deux couches est mal définie sous les blocs perturbateurs. Malgré la déformation de l'interface, la présence des inhomogénéités n'a pas empêché l'investigation des structures plus profondes en terme de valeur de résistivité. Ceci nous conduit à porter plus d'attention lors de l'interprétation à la forme des anomalies. Il existe des programmes commerciaux, tels X2IPI et IP2WIN

(Robain et Bobatchev, 2004), qui permettent d'atténuer ces effets en appliquant un filtre médian ou moyen.



Figure 6.11 : Résultats de la modélisation avec des blocs conducteurs proches des électrodes-(a) modèle de couches considéré -(b) pseudo-section de résistivité apparente calculée pour le modèle montré en (a) -(c) résultat d'inversion de la pseudo-section de résistivité apparente calculée sans la présence des blocs conducteurs -(d) résultat d'inversion de la pseudo-section montrée en (b)

6.3.3 Investigation en profondeur

La détection des zones de plus forte rétention d'eau en profondeur (associées à des résistivités plus faibles) nécessite la réalisation des mesures avec des grands espacements entre les dipôles émetteur et récepteur. Pour cette raison, nous avons loué un système Syscal Pro, 48 électrodes. Au total, 4 profils parallèles PP espacés de 20 m ont été réalisés (durant la 3^{ème} semaine de mesure, du 4/08/08 au 8/08/08) avec un

écartement (a) entre électrodes de 10 m et 25 niveaux (la distance entre le dipôle émetteur et récepteur est n.a, avec n qui varie de 1 à 25). Un cinquième profil de direction NE-SW, traversant les autres profils, a été réalisé pour évaluer la corrélation avec ceux-ci et pour avoir une meilleure estimation de la variation latérale. La figure 6.12 montre l'emplacement des profils réalisés dans le cadre de l'investigation en profondeur avec leur dénomination, utilisée par la suite dans le mémoire.

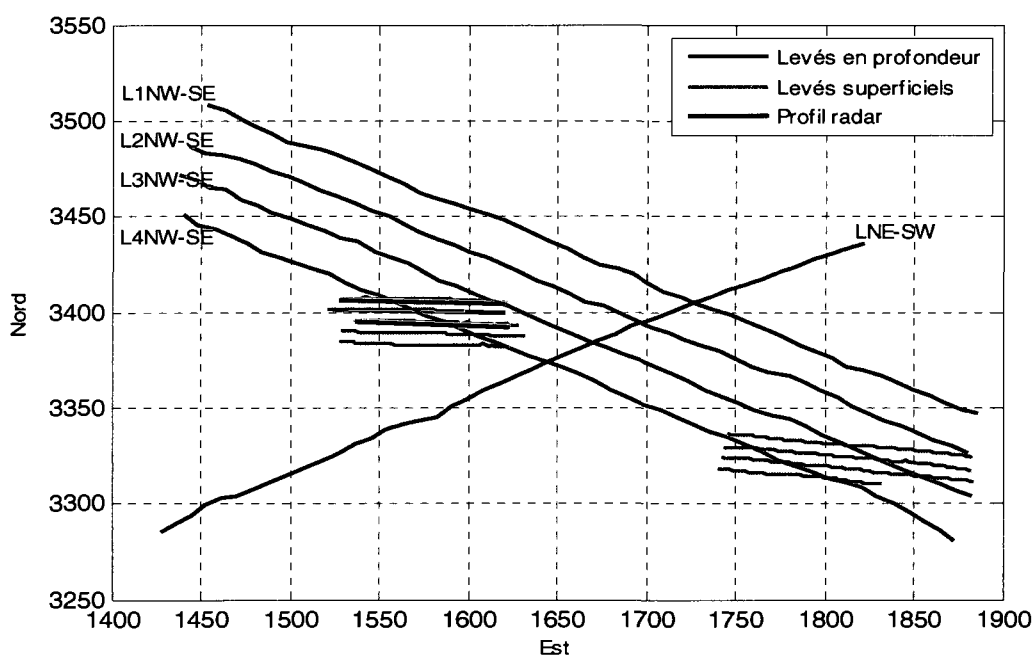


Figure 6.12: Plan de localisation des mesures de résistivité pour l'investigation en profondeur avec leur dénomination (voir aussi figures 6.4 et 6.5)

Les paramètres d'acquisition utilisés permettent d'atteindre une profondeur d'investigation de l'ordre de 60 m. D'autres mesures sont effectuées (pour la corrélation) avec seulement 16 niveaux permettant d'avoir une profondeur d'investigation de l'ordre de 42 m. Les 6 premières électrodes des 4 profils parallèles ont été implantées dans la zone non compactée à l'ouest. On note aussi que durant la semaine de mesure (04/08/08 au 08/08/08), il n'a pas plu et il faisait très chaud. De ce

fait, le matériau en surface était sec et malgré un arrosage important autour des électrodes avec de l'eau salée, la résistance de contact restait élevée (en raison de la faible rétention d'eau par les stériles meubles). Les figures 6.12 et 6.13 montrent respectivement les pseudo-sections brutes de la résistivité et de la chargeabilité dans le cas des mesures avec la séquence de 25 niveaux.

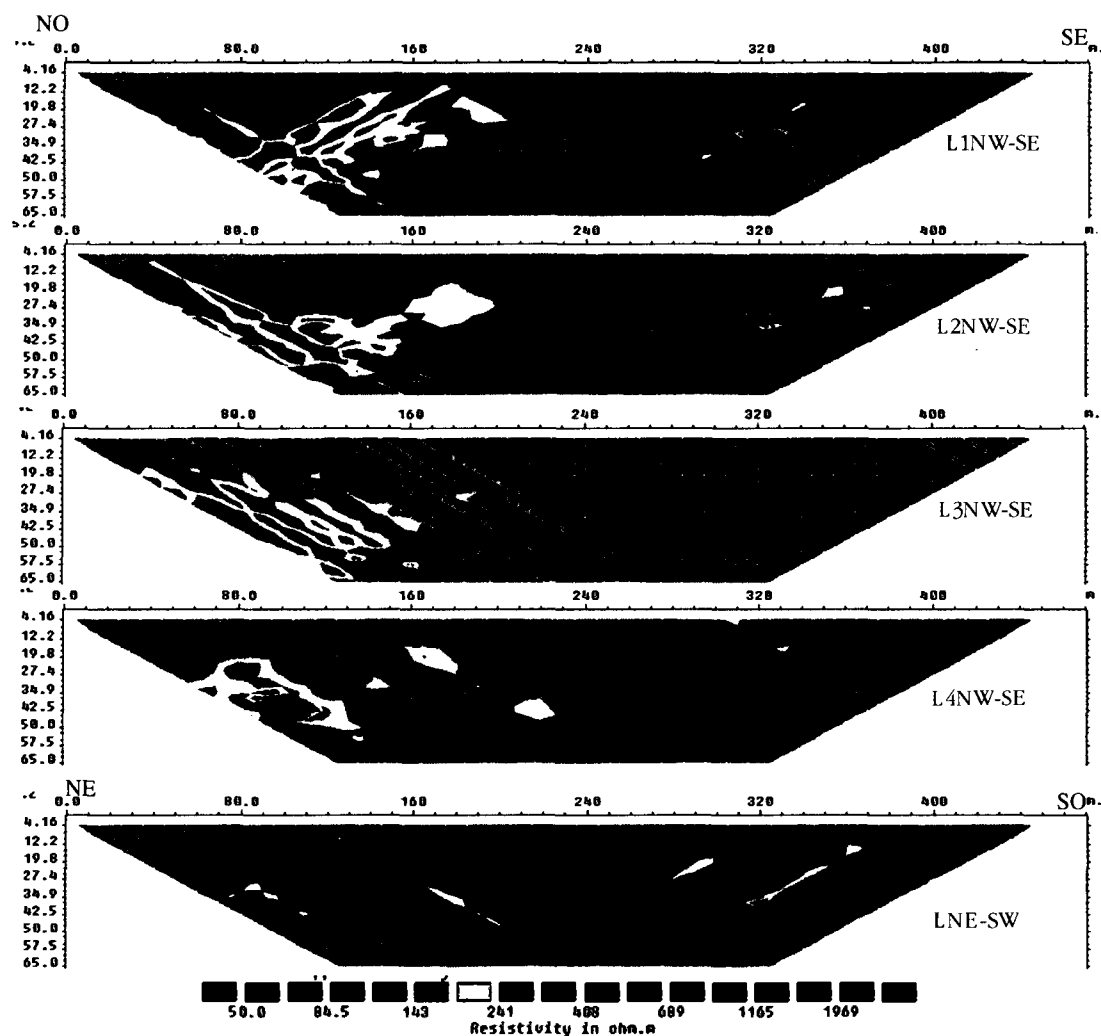


Figure 6.13: Pseudo-sections des mesures de résistivité, profondeur d'investigation de 60 m (25 niveaux).

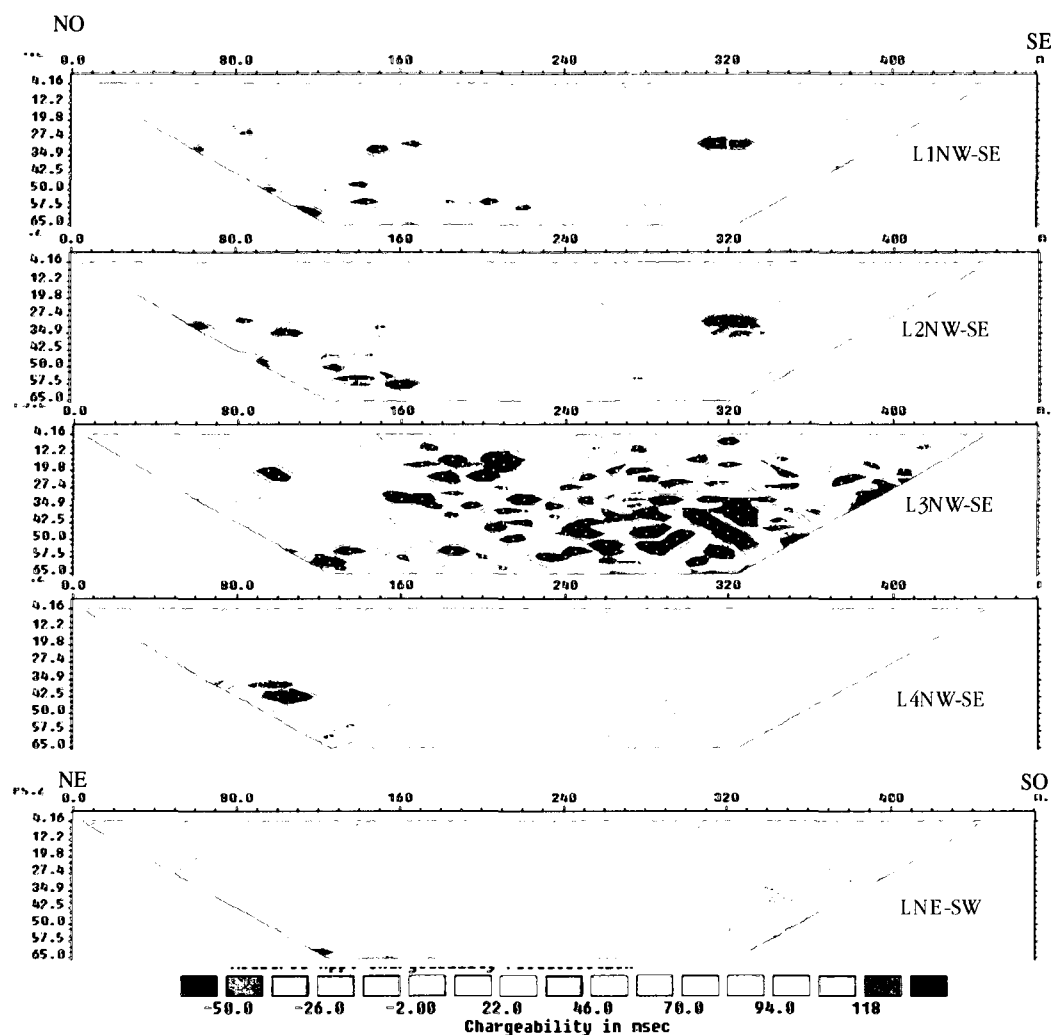


Figure 6.14: Pseudo-sections des mesures de chargeabilité, profondeur d'investigation de l'ordre de 60 m (25 niveaux)

Comme dans le cas des mesures en proche surface, les pseudo-sections brutes dans le cas de l'investigation en profondeur montrent également la présence des effets de distorsion causés par le passage des électrodes près des hétérogénéités locales. Le profil L3NW-SE montre des résistivités très faibles. L'analyse du fichier de mesure a montré que le voltage d'injection était nul (batterie déchargée; malheureusement les mesures n'ont pu être reprises par manque du temps). Le profil LNE-SW (825

lectures) montre que pour les derniers 70 m (du côté sud ouest de la halde), les résistivités apparentes sont élevées. L'analyse du fichier de mesure montre que le courant injecté est de l'ordre de 120 mA, soit 4 fois plus faible que la valeur moyenne injectée habituellement (500 mA). A cet endroit, au sud ouest de la halde, le terrain était très sec et non compacté; malgré un arrosage important, la résistance du contact entre les électrodes et le matériau restait élevée. Cela a empêché l'injection d'un courant plus intense. Le tableau 6.3 montre une analyse d'erreurs effectuée sur les mesures d'investigation en profondeur.

Tableau 6.3 : Analyse des erreurs de mesure de la résistivité, investigation en profondeur

Profils	Écart-type minimum mesuré (%)	Écart-type maximum mesuré (%)	Moyenne des Écarts-type (%)	Nombre de lectures
L1NW-SE	0,0	328,1	20,4	825
L2NW-SE	0,1	492,0	26,8	825
L3NW-SE	0,5	495,3	117,8	825
L4NW-SE	0	220,4	15	825
LNE-SW	0,1	285,5	12,9	825
L1NW-SE	0,2	618,5	8,892	600
L2NW-SE	0	317,3	9,4	600
L3NW-SE	0,2	397,2	27,2	600
L4NW-SE	0	61,9	4,1	600
LNE-SW	0,1	576,2	36	600

En général, l'écart-type est assez faible pour les courtes distances entre le dipôle émetteur et récepteur (le potentiel mesuré est plus important que le bruit géologique notamment le potentiel spontané). Lorsque cette distance devient importante, plus de (150 m) le potentiel mesuré devient faible. Pour ces mesures, l'écart-type devient important.

6.4 Autres mesures

6.4.1 Mesures transitoires

Les mesures électromagnétiques transitoires (effectuées durant la 2^{ème} semaine de mesure soit du 07/07/09 au 11/07/09) sont plus sensibles à la présence des couches conductrices que les méthodes électriques conventionnelles. Elles permettent également d'atteindre des profondeurs d'investigation importantes avec un dispositif de dimension plus petit que dans le cas de la tomographie électrique. Afin de tester cette méthode pour la caractérisation des stériles de la halde Petit Pas, nous avons effectué 11 sondages TDEM le long des profils électriques (aussi pour des fins de corrélation). La figure 6.15 montre l'emplacement des sondages le long de deux levés PP de la zone d'étude I ; soit le levé P3W-E et P4W-E (voir aussi figures 6.4 et 6.5 pour une vue globale du site).

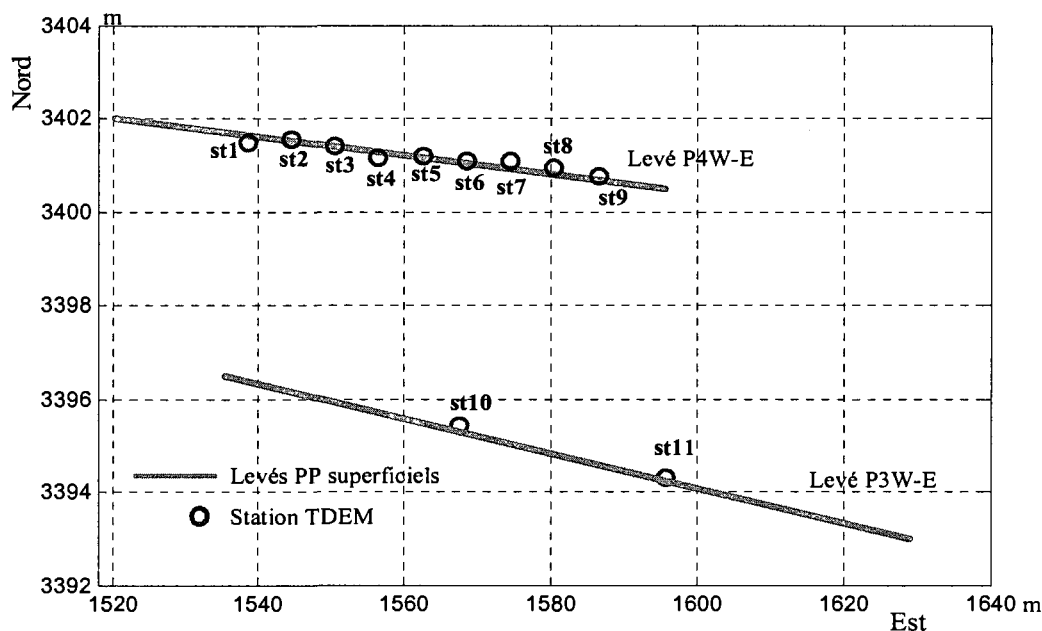


Figure 6.15 : Plan d'emplacement des sondages électromagnétiques transitoires sur la halde le long des levés électriques, P3W-E et P4W-E

Les sondages St1 à St9 ont été réalisés à l'aide d'une boucle émettrice de 8 tours ayant 5 m de côté. La configuration utilisée comporte un déport de 8.5 m entre le centre de la boucle émettrice et la boucle réceptrice (plus de détail sur les configurations est donné au chapitre 2). Le mode central a été évité afin de ne pas saturer le récepteur. Le courant injecté dans la boucle d'émission est équivalent à 4 A. Le temps de coupure ("turn off time") utilisé est 2.8 microsecondes (soit un peu plus court que 5.4 microsecondes normalement utilisé pour ce type de boucle). Les sondages St10 et St11 ont été effectués avec une boucle émettrice simple de 20 m de côté. Les deux configurations (i.e. en boucle centrale et décalée avec déport de 20 m) ont été testées sur les deux stations (St10 et St11). Le bruit électromagnétique a été enregistré aux 2 stations seulement pour la fréquence 75 Hz. La figure 6.16 montre les résultats des sondages bruts après la vérification de la polarité du champ magnétique primaire. D'autres mesures réalisées par M Chouteau en 2007 (du 03/07/07 au 04/07/07) sont montrées sur la figure 6.17. Ces mesures avaient comme objectif de tester la validité des méthodes transitoires sur la halde. Les mesures ont été effectuées avec les 3 fréquences d'enregistrement, soit 285, 75 et 30 Hz.

La station 1 a été localisée près du forage H1 (figure 7.16), et a fait l'objet d'une mesures avec la configuration centrale et celle d'un déport de 16 m. Les stations 2 et 3 ont été réalisées sur la halde Puyjalon. Le mode central et celui d'un déport latéral de 19.5 m ont été utilisés pour ces deux stations. La station 3 a été réalisée sur un endroit qui semblait souillé à l'huile. Le bruit a été également enregistré aux deux stations 1 et 2 pour les fréquences 75 Hz et 30 Hz.

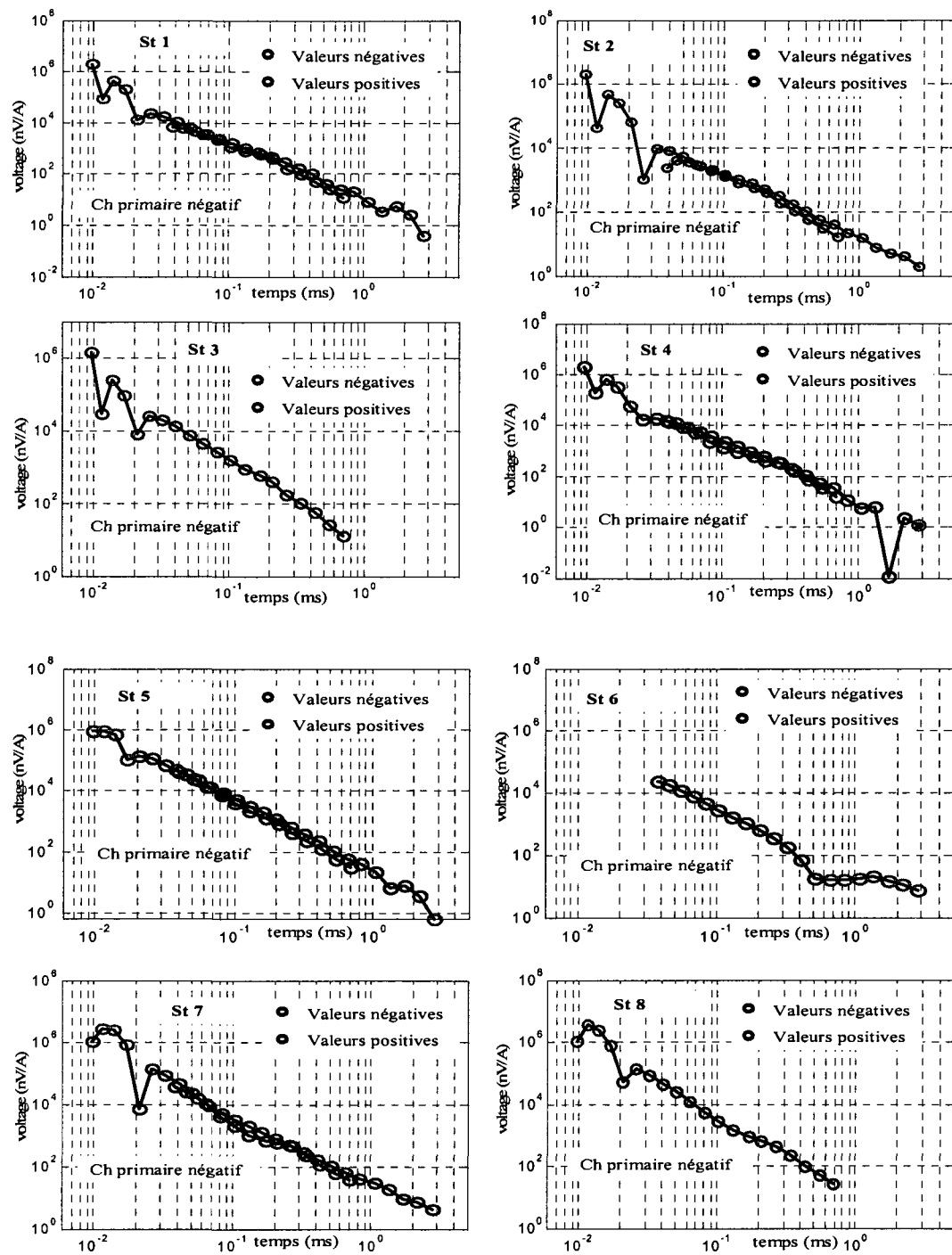


Figure 6.16 : Données brutes des sondages TDEM effectués en 2008

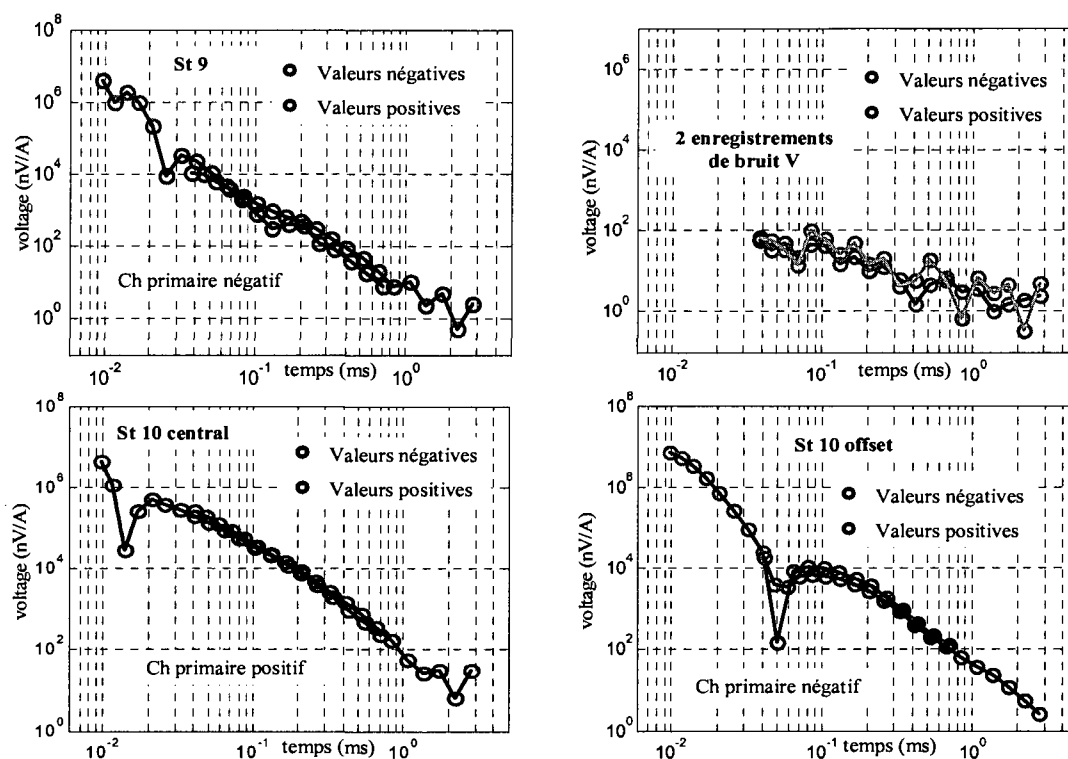


Figure 6.17 : Données brutes des sondages TDEM effectués en 2008 (suite)

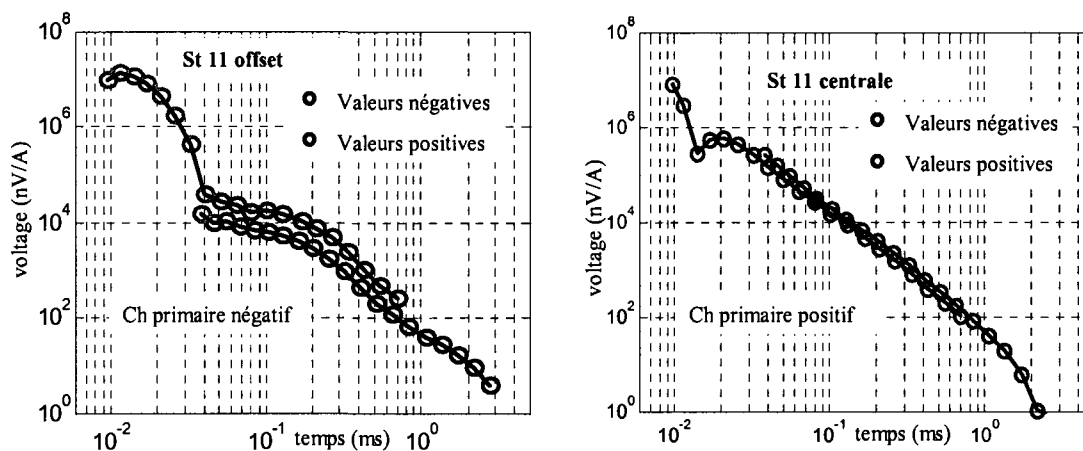


Figure 6.18 : Données brutes des sondages TDEM effectués en 2008 (suite et fin)

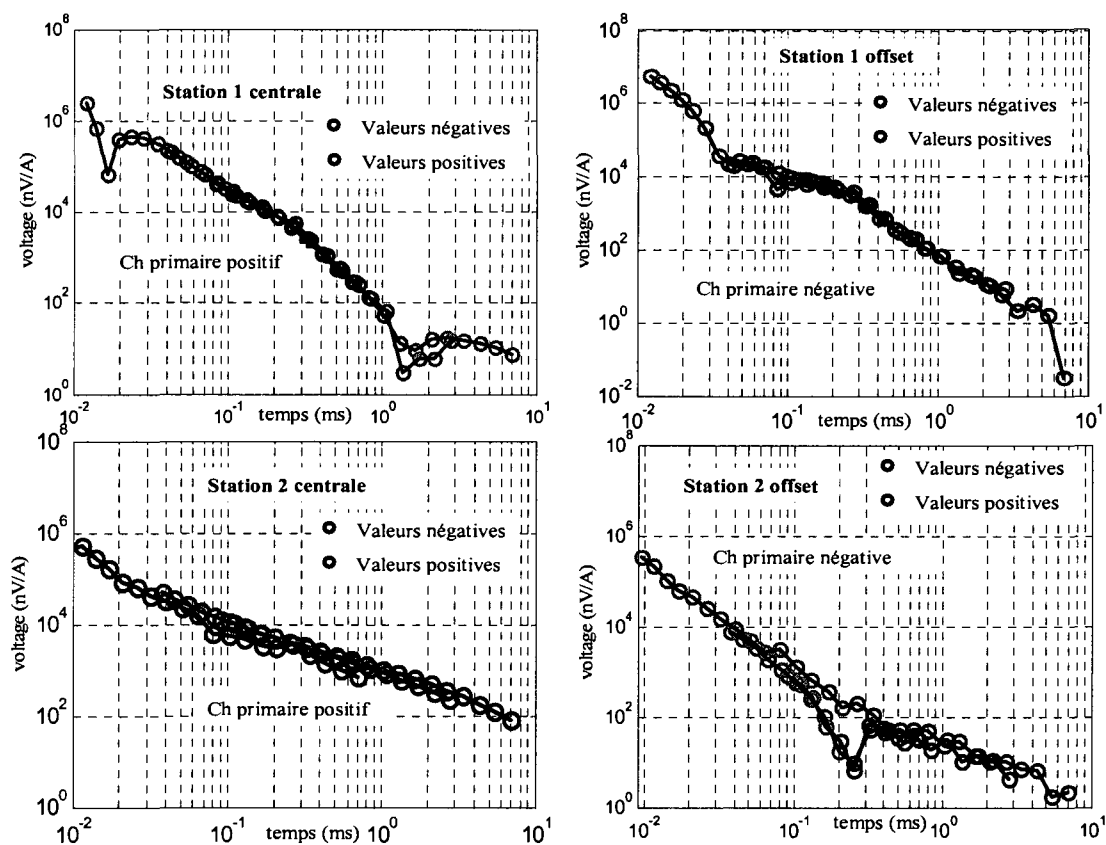


Figure 6.19 : Données brutes des sondages TDEM effectués en 2007

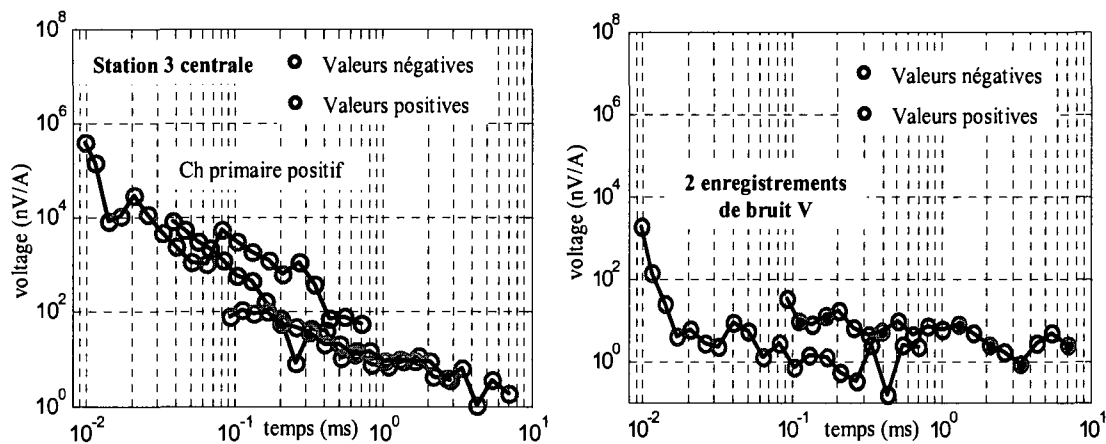


Figure 6.20 : Données brutes des sondages TDEM effectués en 2007 (suite et fin)

Les sondages St1 à St9 ont été réalisés avec une configuration en déport latérale de 8.5 m. De ce fait, le champ magnétique primaire (CHP) mesuré au niveau du récepteur était négatif. Après la coupure du CHP, le champ magnétique secondaire induit (CHS) est du même sens que le CHP, soit positif à l'intérieur de la boucle d'émission et négatif à l'extérieur. Comme, la configuration adoptée est celle en déport latérale, cela explique la valeur négative mesurée (1^{er} point) du CHS à 10^{-2} ms pour la majorité des sondages (exemple St1, St2, St9). Après ce temps (10^{-2} ms) correspondant à la première mesure négative, les courants de conduction diffusent et passent sous la boucle réceptrice; le champ secondaire devient positif au niveau de la boucle réceptrice. Ceci explique l'apparition des valeurs positives entre $1.15 \cdot 10^{-2}$ ms et $3 \cdot 10^{-2}$ ms. Après cette période, le champ secondaire mesuré devient de nouveau négatif sur l'ensemble des sondages effectués. Cela est contraire à l'état usuel de la polarité du champ secondaire induit par des courants de conduction. Ce phénomène d'inversion de signe pourrait être causé par des effets de polarisation provoquée (PP) qui induisent des courants de polarisation dans un sens contraire aux courants de conduction. Les mesures effectuées en 2007 montrent également ce comportement. Le niveau du bruit mesuré, à une fréquence de 75 Hz, est inférieur à 10^2 nV/A. Cela signifie que les valeurs du champ magnétique secondaire situées au dessus du niveau de bruit sont des réponses à des structures dans la halde plutôt qu'un bruit EM ambiant (bruit géologique et instrumentale). La distorsion des sondages transitoires par l'effet de dispersion (effet PP) rend l'exploitation des mesures très difficiles et incertaines. Plus de détails sur ce phénomène de distorsion avec des simulations explicatives sont donnés dans l'annexe 1.

6.4.2 Mesures radar

En plus des mesures électriques et TDEM, nous avons réalisé des profils radar pour investiguer les structures peu profondes de la halde. Cette approche avait été testée sur la halde de la mine Laronde par Poisson et al (2008). Les résultats obtenus étaient encourageants. Sur la halde Petit Pas, 3 profils radar (plan de localisation donné à la

figure 6.6) d'environ 100 m de longueur ont été acquis en utilisant une fréquence de 100 MHz. Les mesures sont effectuées en mode réflexion avec une trace tout les 10 cm et une sommation de 128 (le profil Ra1, 100 MHz, est enregistré avec un pas de 20 cm). Ce profil, Ra1, a fait aussi l'objet d'une acquisition avec une fréquence de 200 MHz. Étant donné que la vitesse des ondes radar dans les milieux géologiques varie entre 0.06 m/ns à 0.15 m/ns, un temps double de lecture de 150 ns représente une pénétration maximale de 4.5 m à 11 m. Ce temps de lecture s'est avéré suffisant puisque le signal était atténué vers 80 ns. La figure 6.18 montre les données brutes (1^{ère} semaine de mesure, 9 à 13 juin 2008). Ces images montrent que le signal est très atténué (faible profondeur d'investigation). Cette atténuation pourrait être due à la très grande hétérogénéité du matériau qui disperse l'énergie ainsi qu'à une absorption du signal par des structures conductrices. Le traitement et l'interprétation de ces mesures sont donnés dans l'annexe 1.

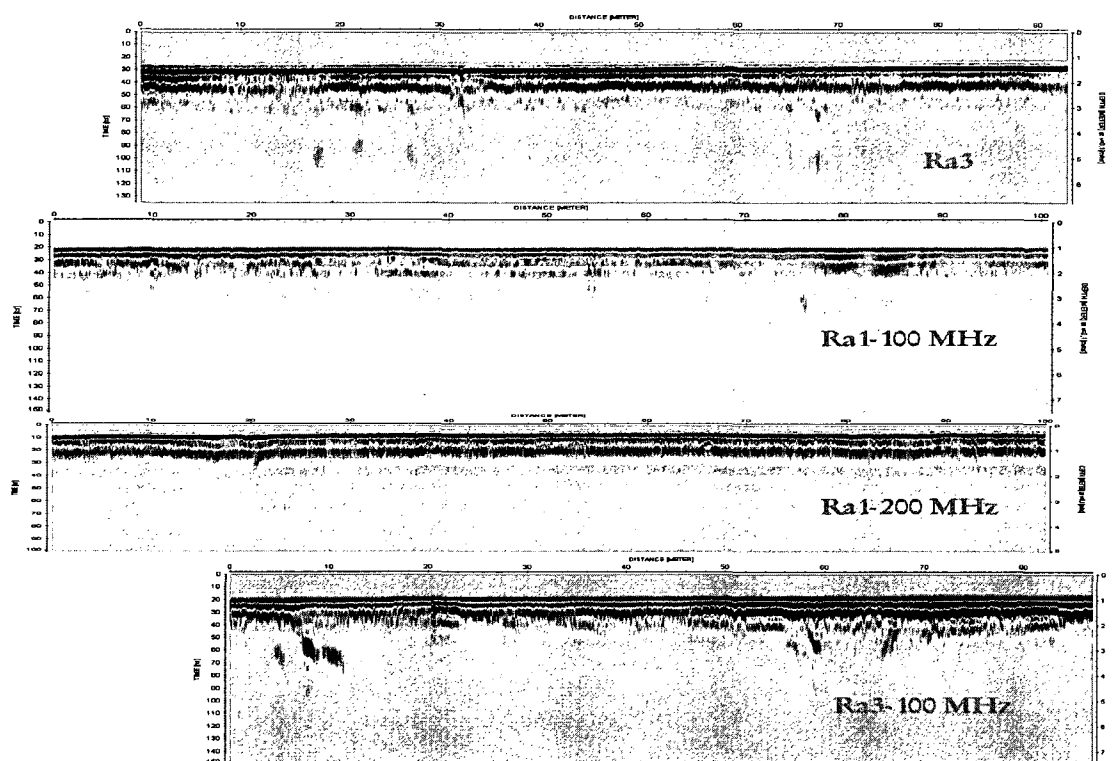


Figure 6.21 : Images radar brutes, investigation en proche surface

En considérant les résultats bruts des mesures effectuées sur la halde, il paraît que seule la méthode électrique présente des données exploitables pour l'étude de la structure interne de la halde. Dans le chapitre 7, nous présentons le traitement, l'analyse et l'interprétation possible des mesures électriques. Une analyse des données géoradar et TDEM est donnée en annexe 1.

Chapitre 7 : Traitement et interprétation des données

7.1 : Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les mesures traitées et leur interprétation en terme de la structure de la halde. Les mesures électriques apparaissent plus diagnostiques en comparaison des mesures radar et électromagnétiques transitoires. De ce fait, l'attention a surtout été portée sur l'analyse de ces mesures. Au départ, nous avons testé plusieurs séquences de traitement afin de distinguer, dans les modèles obtenus par inversion, les effets liés aux éléments de la structure dans la halde des autres effets liés purement aux processus numériques et aux paramètres d'inversion. Ensuite, nous avons réalisé des inversions 3D dans le but de déterminer les effets des variations latérales de la résistivité sur les mesures 2D. Nous avons également effectué des modélisations en considérant les modèles de résistivité obtenus par inversion 2D afin de vérifier leur robustesse.

7.2 Traitement et interprétation des mesures PP en proche surface

7.2.1 Inversion 2D et interprétation des données de résistivité

Les données PP ont été acquises à l'aide du résistivimètre Syscal Pro et transférées de la mémoire interne vers l'ordinateur à l'aide du logiciel Prosys II (version 2.29, Iris Instruments, 2009). Ce logiciel permet également d'effectuer des traitements préliminaires tels que : l'élimination des lectures négatives, la suppression des mesures dont l'écart-type (RMS) dépasse une limite prédéfinie par l'utilisateur, la visualisation des pseudo-sections, etc. De plus, le logiciel permet d'exporter les données dans un format lisible par le logiciel Res2DINV (Loke et al, 1996) afin qu'elles soient inversées. On note qu'un seul profil (P4W-E) a été enregistré avec le Lund Imaging System (ABEM).

Les mesures PP réalisées sur les deux zones d'investigation en proche surface montrent que les données sont de bonne qualité, l'écart-type étant de l'ordre de 1%.

Le profil L4 fait exception car il présente vers la fin des valeurs de résistivité très faibles avec des écarts-type très élevés (plus de 200 %). Ces lectures sont probablement liées à des problèmes d'alimentation ou à l'état du sous-sol très sec et non compacté à cet endroit. Ces mesures sont supprimées avant l'inversion des données. Dans la suite, on définit les principaux paramètres d'inversion de la séquence de traitement utilisée pour l'inversion des données PP (mesures en proche surface).

Séquence de traitement principale appliquée aux mesures électriques à l'aide du logiciel RES2DINV

- Élimination des résistivités négatives, qui sont causées par des problèmes d'acquisition (rapport signal/bruit).
- Élimination des résistivités dont l'écart-type dépasse une certaine valeur (autour de 40 %), déterminée en fonction de la qualité globale des données.
- Définition du facteur d'amortissement : ce paramètre est fonction du niveau de bruit associé aux mesures. Pour les mesures très bruitées, une valeur de l'ordre de 0.3 permet de stabiliser le processus d'inversion et de réduire l'effet du bruit.
- Effet de filtre ("Ratio of the vertical/horizontal filter weight") : ce paramètre permet de donner plus de poids (au cours du processus d'inversion) aux variations verticales ou horizontales, selon les cas. Dans le cas où l'on suspecte que les anomalies de résistivité sont allongées verticalement, une valeur entre 1.5 et 2 est jugée optimale alors qu'une valeur de 0.5 à 0.8 permet de donner plus de poids aux variations horizontales. La valeur de 1.0 donne un poids égal aux deux directions.
- Choix du type de la grille : Ce paramètre est en fonction du contraste de la résistivité. Pour des changements marqués de résistivité, un maillage plus fin

est nécessaire pour déterminer avec plus d'exactitude la distribution de la résistivité dans le modèle alors que pour les changements faibles, un maillage de taille plus grand est utilisé.

- Nombre de nœuds entre deux électrodes adjacentes : le programme permet de choisir 2 ou 4 nœuds en fonction des contrastes de la résistivité et la précision recherchée.
- Méthode de modélisation directe : au cours du processus d'inversion, Res2Dinv peut utiliser soit la méthode des différences finies ou des éléments finis. La méthode des différences finies est plus rapide mais dans le cas où les mesures sont données avec la topographie, il est recommandé d'utiliser la méthode des éléments finis (qui donne plus de flexibilité sur la géométrie).
- Type d'inversion : il existe deux principales méthodes d'inversion : la méthode par moindres carrées (L2) et la méthode robuste (L1). La méthode L2 applique une contrainte de lissage au modèle afin de ne pas avoir des variations de résistivité trop brusques. La méthode L1 permet de mettre en évidence des anomalies de résistivité avec des limites plus nettes. Le principe des deux méthodes a été présenté au chapitre 2.
- La séparation à l'intérieur des sections obtenues par inversion des variations causées par les structures dans la halde et les artéfacts numériques (provenant principalement au processus d'inversion) nécessitent la comparaison des sections issues de différentes séquences de traitement. Les structures réelles (robustes) devraient apparaître dans toutes les séquences de traitement (réalistes). Nous présentons dans la suite une comparaison de 4 sections de résistivité du même profil, P5W-E, obtenues en appliquant 4 séquences de traitement différentes.

✓ Séquence de traitement 1

- Élimination des résistivités négatives : pas de lecture négative dans ce profil.

- Élimination des résistivités dont l'écart type dépasse 40 % : dans le cas de ce profil, seulement 5 lectures sont supprimées.
- Facteur d'amortissement ("facteur de damping") : une valeur de 0.15 a été utilisée puisque les données sont relativement bonnes.
- Facteur filtre ("Ratio of the vertical/horizontal filter weight") : une valeur de 1.5 est retenue.
- Type de la grille : choix de maillage fin ("Finer mesh").
- Nombre de nœuds entre deux électrodes adjacentes : 4.
- Méthode de modélisation : éléments finis.
- Type d'inversion : robuste (L1) avec 5 itérations.
- Suppression des mesures qui présentent un grand écart avec les résistivités apparentes de la pseudo-section calculée. On regarde l'histogramme qui présente l'erreur moyenne quadratique (RMS) entre les résistivités apparentes de la pseudo-section mesurée et calculée, après 5 itérations, et on supprime les mesures qui se reproduisent avec des erreurs jugées trop élevées. Dans le cas des mesures d'investigation en proche surface, une limite de 12 % a été utilisée. Pour ce profil, 13 points sont supprimés en considérant la limite de 12 %. Une fois que les mesures suspectées sont supprimées, on enregistre les données dans un autre fichier pour la lecture et la nouvelle inversion;
- Ré-inversion avec 8 itérations.

✓ Séquence de traitement 2

La séquence de traitement numéro 2 est la même que la séquence numéro 1 mais en utilisant la méthode des moindres carrées (L2) au lieu de la méthode robuste (L1). Dans ce cas, 17 lectures sont supprimées avec la limite de 12 %.

✓ Séquence de traitement 3

La séquence numéro 3 est la même que la séquence numéro 1 mais en utilisant une grille moins fine ("Normal mesh") et 2 nœuds entre deux électrodes adjacentes. Dans ce cas, 21 lectures sont supprimées pour la limite de 12 %.

✓ Séquence de traitement 4

La séquence de traitement numéro 4 est la même que la séquence numéro 1 mais en donnant plus de poids aux variations latérales de résistivité qu'aux variations verticales ; "Ratio of the vertical/horizontal filter weight": 0,8. Dans ce cas, 14 lectures sont supprimées pour la limite de 12 %.

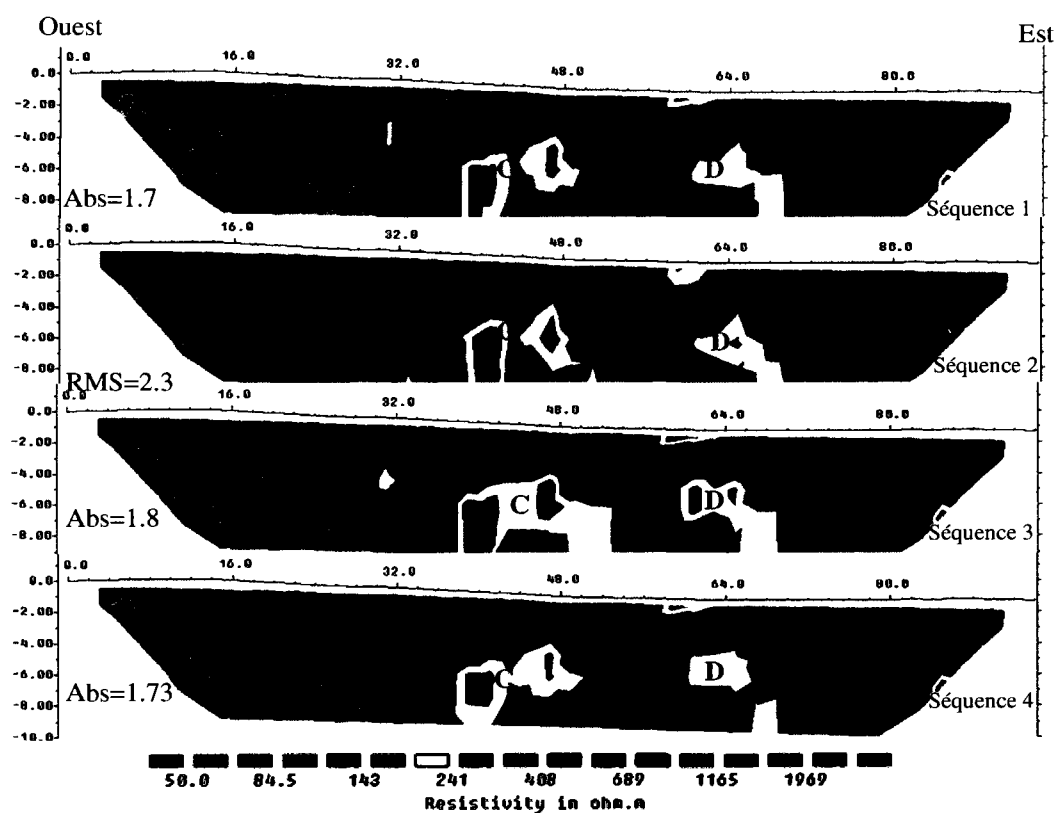


Figure 7.1 : Comparaison des calculs d'inversion pour les quatre séquences décrites ci-dessus appliquées au cas du profil P5W-E; les erreurs de reproduction sont inférieures à 2.3 %

La comparaison des sections issues des différentes séquences de traitement montre que la section 2 manifeste des variations graduelles de résistivité contrairement à la section 1 qui montre des anomalies de résistivité avec des limites plus nettes. Les sections 1 et 3 sont pratiquement identiques sauf au niveau de l'anomalie C qui est plus large dans le cas de l'utilisation d'un maillage plus grossier avec 2 nœuds entre deux électrodes adjacentes. La comparaison des sections 1 et 4 montre qu'en donnant plus de poids pour les variations horizontales, les structures sont légèrement plus allongées horizontalement (section 4).

Mise à part quelques différences mineures au niveau de la distribution de résistivité d'une séquence à l'autre, toutes les anomalies de résistivité les plus marquées sont mises en évidence dans toutes les sections de la figure 7.1. Cela soutient l'hypothèse que ces structures reflètent des changements réels des propriétés électriques dans les stériles, et ne sont pas dues simplement au processus numérique d'inversion.

Notre objectif consiste à déterminer des structures de résistivité avec des limites les plus nettes possible afin de faire ressortir les anomalies de résistivité/chargeabilité (même celles de faible taille). Pour cette raison, nous avons choisi la séquence de traitement numéro 1 (méthode d'inversion L1 et un maillage fin) pour le traitement de toutes les mesures de résistivité réalisées pour l'investigation de la proche surface.

La figure 7.2 montre les résultats d'inversion des mesures de résistivité pour la zone I. Le plan de localisation des profils est donné à la figure 6.6. De manière générale, les valeurs observées sont bien reproduites par les réponses calculées avec une erreur quadratique moyenne inférieure à 2.5 % (figure 7.2). Cela indique que les mesures sont de bonne qualité et que les variations de résistivité mises en évidence dans les sections reflètent bien les changements dans les propriétés électriques des stériles en proche surface. La profondeur d'investigation est ici de l'ordre de 8 m sauf pour le profil P4W-E, réalisé avec le "Lund Imaging System" qui montre une profondeur d'investigation de 11 m. L'examen des sections de résistivité montre que la résistivité des stériles en proche surface varie de 300 $\Omega.m$ à 1500 $\Omega.m$ (figure 7.2). Les mesures

de la résistivité des stériles réalisées au laboratoire ont montré des variations assez similaires avec des valeurs entre 280 et 560 $\Omega.m$ pour des degrés de saturation variant de 95% à 35% (chapitre 5). La partie ouest des profils montre des zones résistives (anomalies A, B et C). L'observation durant la réalisation des mesures a montré que cette zone n'est pas aussi dense et que les stériles retiennent moins d'eau à cet endroit. La partie est des profils P1W-E et P2W-E présente une couche superficielle résistive (environ 1500 $\Omega.m$) d'une épaisseur d'environ 2 m. Cette couche est moins compactée avec une faible teneur en eau. Les petites anomalies conductrices (figure 7.2, couleur rouge et jaune) de faibles dimensions proviennent probablement d'une composition plus riche en minéral ou à des zones à granulométrie plus fine retenant plus d'eau. La corrélation latérale entre les profils est assez bonne, notamment entre le profil P5W-E et P4W-E d'un côté et entre les trois autres profils au sud de l'autre côté. Cela indique que la variation latérale de la résistivité est assez faible.

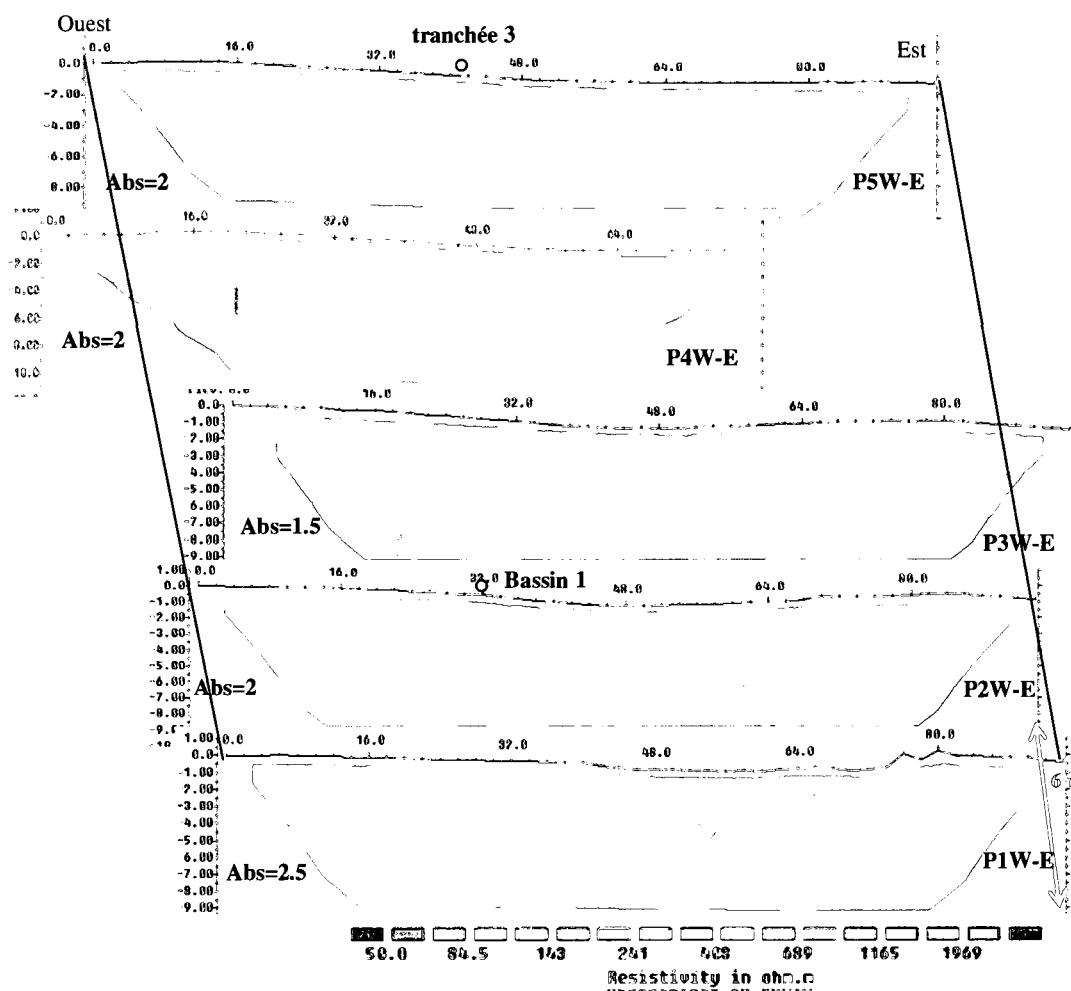


Figure 7.2 : Résultats des calculs d'inversion des mesures de résistivité effectuées sur la zone I en utilisant la séquence de traitement numéro 1. Le profil P5W-E est situé à 1 m de la paroi de la tranchée 3. Le profil P3W-E passe au dessus du bassin d'infiltration 1

La figure 7.3 montre les résultats des calculs d'inversion des levés réalisés sur la zone II (cf. la figure 6.6 pour la localisation). Les sections obtenues par inversion des mesures effectuées sur la zone II montrent que les mesures sont bien reproduites par les réponses calculées, avec des erreurs quadratiques moyennes inférieures à 3.4 %. On constate une certaine corrélation latérale entre les 4 profils. La partie ouest montre

des structures résistives ($\rho > 1000 \Omega.m$) alors que le sous-sol est dense à ces endroits, sauf au niveau du profil L4. Ces résultats reflètent probablement la présence des stériles avec une faible teneur en minéral. Au niveau de la partie est, on note une tendance à la stratification horizontale. Cette stratification est composée d'une couche en surface d'une épaisseur de 2 m avec une résistivité d'environ $520 \Omega.m$ suivie d'une autre plus conductrice, d'une résistivité de $320 \Omega.m$ avec une épaisseur d'environ 4 m. La 3^{ème} couche de la stratification apparaît à environ 6 m de profondeur, elle est légèrement plus résistive que celle du dessus avec une résistivité variant de $400 \Omega.m$ à $500 \Omega.m$. Les limites entre les trois couches sont plus au moins nettes, et montrent des déformations qui sont probablement causés par des effets d'hétérogénéités en proche surface. Ces effets sont plus clairs sur les pseudo-sections mesurées (figure 6.10, chapitre 6). Les stratifications observées correspondent probablement à des structures dans la halde produites par la circulation des équipements à la surface d'un banc avant la construction du banc subséquent. À l'intérieur de la 2^{ème} couche (figure 7.3), on note la présence d'anomalies conductrices de faibles dimensions et discontinues. Ces anomalies sont probablement causés par la présence des stériles plus minéralisés (disposition de stériles avec une teneur plus élevée en hémio-ilménite). Pour le profil, L4, la présence de la couche résistive en surface (environ $2000 \Omega.m$) est due essentiellement à l'état des stériles (meubles et sec).

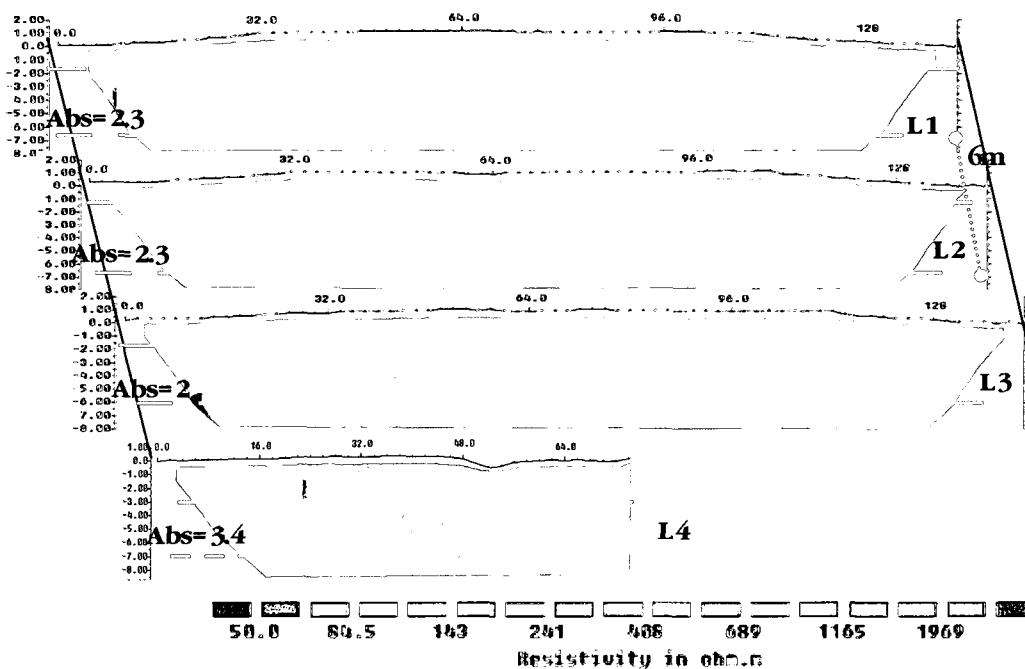


Figure 7.3 : Résultats des calculs d'inversion des mesures de résistivité au niveau de la zone II en utilisant la séquence de traitement 1. Les lignes en trait tireté rouge délimitent la couche conductrice

Les photos prises sur les parois des tranchées, creusées à 3 positions différentes de la halde, montrent la présence de stratifications inclinées, avec une alternance de couches de propriétés physiques différentes. La figure 7.4 montre un exemple de stratification inclinée. On voit notamment une couche contenant une teneur plus élevée en hémioilménite (couleur noir et foncée) avec une granulométrie plus fine (couche 2, figure 7.4). Cette couche repose sur une autre moins minéralisée (en apparence) avec une granulométrie plus étalée (couche 1, figure 7.4).

La différence des propriétés minéralogiques et granulométriques (constatée par inspection visuelle) dans les couches montrées dans la paroi de la tranchée (figure 7.4) proviendrait essentiellement d'origines différentes des stériles mises en place. La pente des couches correspond à l'angle de dépôt des stériles, qui est de l'ordre de 37 degrés.

Les mesures électriques réalisées le long du profil électrique P5W-E (figure 7.2), qui passe à 1 m de la paroi de la tranchée 3 avec une direction parallèle à celle-ci, ne montre pas la stratification observée au niveau de cette dernière.

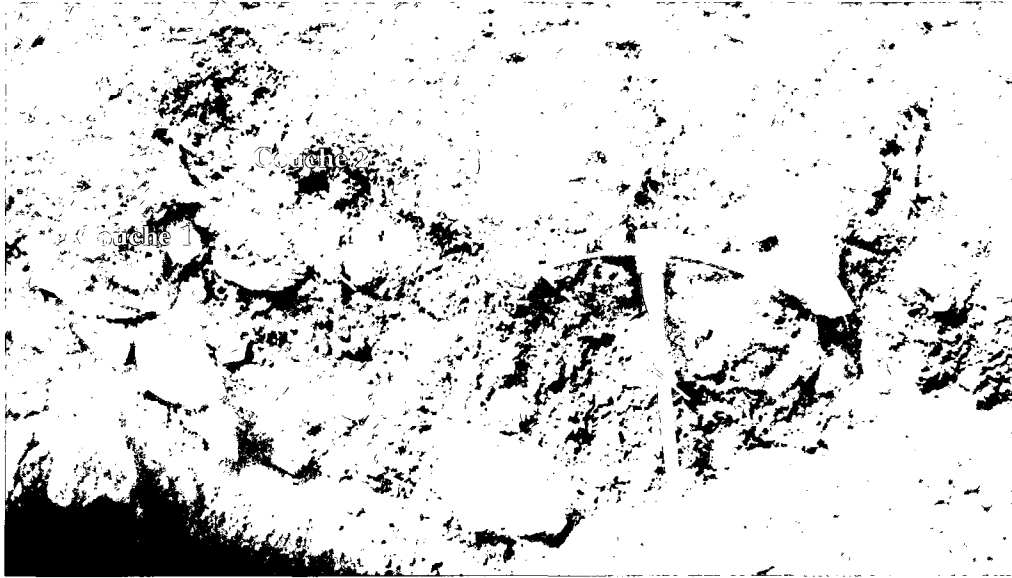


Figure 7.4 : Photo de la paroi de la tranchée 3 montrant des stratifications inclinées

Pour vérifier la capacité des méthodes électriques à détecter ce type de stratification, nous avons conduit une modélisation avec le logiciel Res2Dmod (en utilisant les mêmes paramètres que ceux utilisés lors de l'acquisition). Le modèle construit est basé partiellement sur la résistivité moyenne observée sur le profil P5W-E tout en ajoutant des structures inclinées composées d'alternance de couches conductrices ($100 \Omega.m$) et résistantes ($700 \Omega.m$). Ces structures inclinées sont mises avec une pente de 45° , supérieure à celle observée dans les parois des tranchées (environ 37°). Le maillage adopté est régulier composé des cellules de 50 cm de longueur et une épaisseur de 0.25 m (ce qui rend difficile la construction des blocs connectés avec une pente de 37°).

Les couches conductrices (inclinées) ont des épaisseurs variables (0.5 m à 2 m), à des profondeurs différentes. La figure 7.5 présente le modèle construit ainsi que la section

obtenue par inversion (en ajoutant un bruit de 2 %) en utilisant le même maillage que celui de la modélisation.

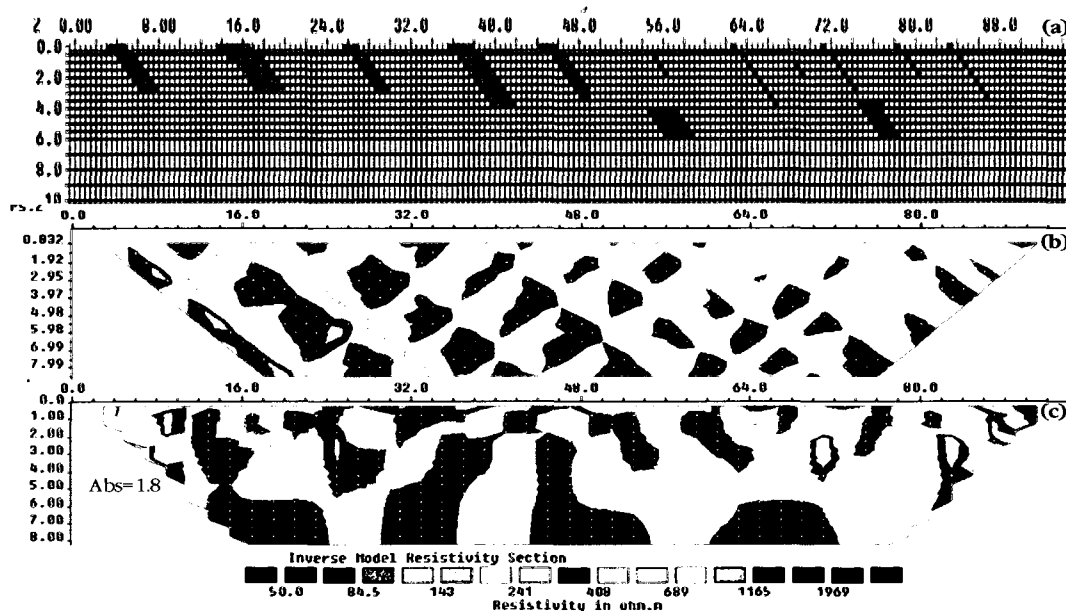


Figure 7.5 : Résultat de la modélisation (a) modèle avec stratification inclinée (b) pseudo-section calculée (c) section obtenue par inversion de la pseudo-section (b)

L'analyse de la figure 7.5b montre que la pseudo-section calculée est très affectée par la présence des couches conductrices inclinées en proche surface. Ces effets dits "à coups de prise" (cf. chapitre 2 et 6) sont également très présents dans les pseudo-sections mesurées (figure 6.7 et 6.9, chapitre 6) indiquant probablement la présence de ces structures inclinées aux endroits investigués. La section obtenue par inversion (figure 7.5c) de la pseudo-section calculée montre que ces structures sont perçues pour les faibles profondeurs, mais avec des tailles et des pendages différents de celles d'origine. Par exemple, sous le point 46 m, la mise en place d'une structure similaire à celle observée dans les tranchées est imagée par une anomalie plus résistive et plus verticale que le cas réel. Cependant, plus les structures sont profondes plus il est difficile de les identifier à cause de la diminution de la résolution en fonction de la profondeur. Comme exemple, sous les points 56 m et 76 m, les structures conductrices

situées à 4 m de profondeur n'apparaissent pas dans la section inversée. Suite aux résultats de cette modélisation, il paraît difficile de bien détecter les structures observées dans les tranchées avec leur vraie géométrie en utilisant les paramètres d'acquisition utilisés sur le terrain (on détecte juste la portion moins profonde des couches inclinées). Cela est expliqué par l'effet d'homogénéisation. En effet, lorsque la taille du dispositif de mesure est plus importante que celle des inclusions recherchées, les structures détectées par les méthodes électriques apparaissent plus homogènes (Rey, 2005).

7.2.2 Inversion 3D des données de résistivité en proche surface

Afin de déterminer l'effet des variations latérales de résistivité sur les mesures électriques 2D, nous avons réalisés des inversions 3D. L'inversion des mesures a été effectuée à l'aide du programme Res3Dinv développé par Loke et al (2002). Ce logiciel échantillonne le volume étudié en parallélépipèdes rectangles et recherche la valeur de résistivité de chacune des cellules qui minimise la différence entre les résistivités apparentes calculées et mesurées. L'algorithme d'inversion est basé sur la méthode "smoothness-constrained least-squares method" (Sasaki, 1992) avec la possibilité d'utiliser la technique d'optimisation quasi-Newton (Loke and Barker, 1996). Le logiciel Res3Dinv nécessite que les électrodes soient réparties sur une grille rectangulaire. De ce fait, nous avons utilisé seulement les données des profils parallèles avec une grille trapézoïdale permettant de prendre en considération la non-uniformité de la grille (les fichiers d'entrée pour les 2 zones d'étude en proche surface sont données en appendice 7.1 sur le CD joint au mémoire). Les paramètres d'inversion et le maillage sont presque les mêmes que dans le cas 2D.

Le logiciel DC3DInvRes développé par Günther (2007) a également été testé avec ces données. Le fichier d'entrée (fichier texte) pour DC3DInvRes est composé des coordonnées des électrodes suivies par une matrice de 6 colonnes où chaque ligne indique la combinaison des 4 électrodes utilisées dans la mesure suivie de la valeur de la résistivité (ou la résistance) et l'erreur quadratique moyenne associée à chaque

lecture. Les fichiers d'entrée ainsi que les résultats d'inversion obtenus avec ce logiciel sont donnés dans l'appendice 7.2 jointe sur le CD. Le temps de calcul avec le logiciel DC3DInvRes est très long (par exemple, pour 1785 lectures et un maillage moyen, il faut plus de 6 h). Cela limite la possibilité de raffiner le maillage, ainsi que l'étude de l'influence de chacun des paramètres d'inversion sur les résultats obtenus. L'ajustement entre les mesures et les modèles calculés est plutôt faible (RMS dépasse 20 %), ce qui limite la fiabilité des modèles 3D obtenus.

L'inversion des données de la zone I a été réalisée (à l'aide du Res3DInv) en considérant les mesures sur les trois profils, P1W-E, P2W-E et P3W-E (plan de localisation, figure 6.6) en prenant en compte la topographie. Le profil P4W-E et P5W-E sont écartés car ils sont trop décalés vers l'ouest. Au niveau de la zone II, les données des lignes L1, L2 et L3 (plan de localisation, figure 6.6) sont considérées pour l'inversion 3D. La taille des cellules du maillage utilisé est du même ordre de grandeur que celui utilisé dans le cas de l'inversion 2D. Le logiciel Res3DInv fournit des sections horizontales et verticales selon les axes X et Y. Malheureusement, les options graphiques du logiciel Res3DInv sont limitées et ne permettent pas de définir la position des coupes, mais il affiche un certain nombre dont les positions sont automatiquement prédéfinies par ses fonctions graphiques. Les figures 7.6, 7.7, 7.8 et 7.9 montrent des comparaisons entre les sections obtenues à l'aide de l'inversion 2D et les coupes verticales (issues de l'inversion 3D) qui leur sont proches. Les mesures sont reproduites par l'inversion 3D avec une erreur quadratique moyenne de l'ordre de 7 %.

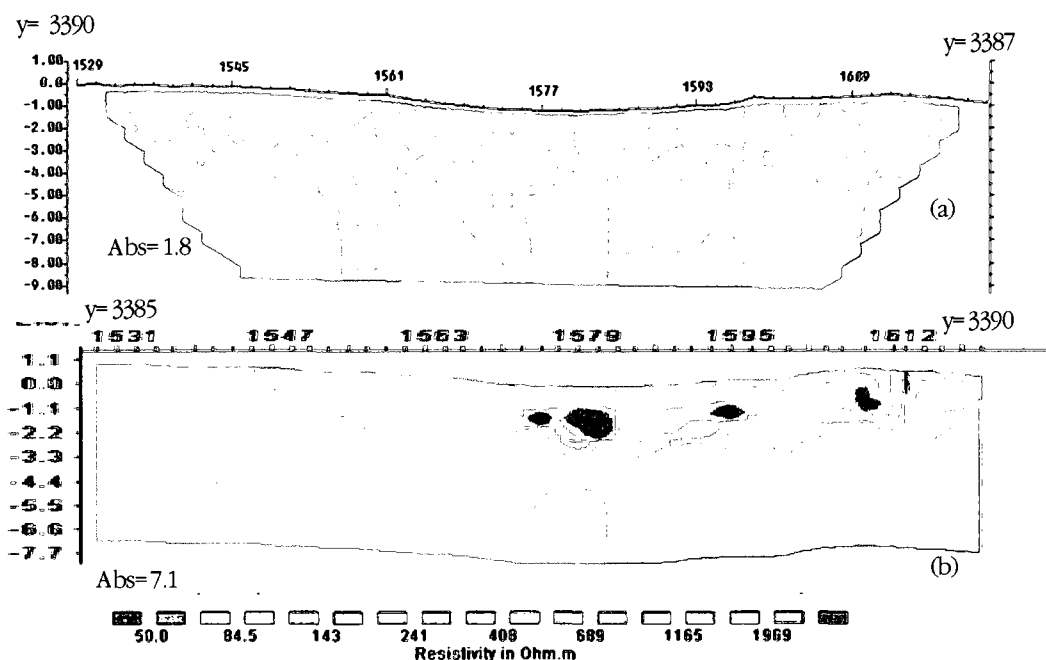


Figure 7.6 : Comparaison entre une section obtenue par inversion 2D (a) et celle obtenue par inversion 3D (b); cas du levé P2W-E

La figure 7.6 montre que la distribution de la résistivité pour la section 2D et 3D est assez similaire dans le cas du levé P2W-E, sauf quelques différences constatées par endroit. Par exemple, la couche résistive à l'est du profil P2W-E apparaît plus résistive et plus allongée vers l'ouest dans le cas de l'inversion 3D qu'en 2D. Sous cette couche résistive, l'inversion 3D montre la présence d'une couche homogène d'une résistivité de 400 $\Omega.m$, alors que l'inversion 2D montre une structure un peu plus complexe avec la présence de deux couches avec des résistivités différentes (400 et 540 $\Omega.m$). On note aussi l'absence dans la section 2D de petites anomalies conductrices qui sont mises en évidence sous les points 1579 m et 1595 à 1.3 m de profondeur dans la coupe 3D.

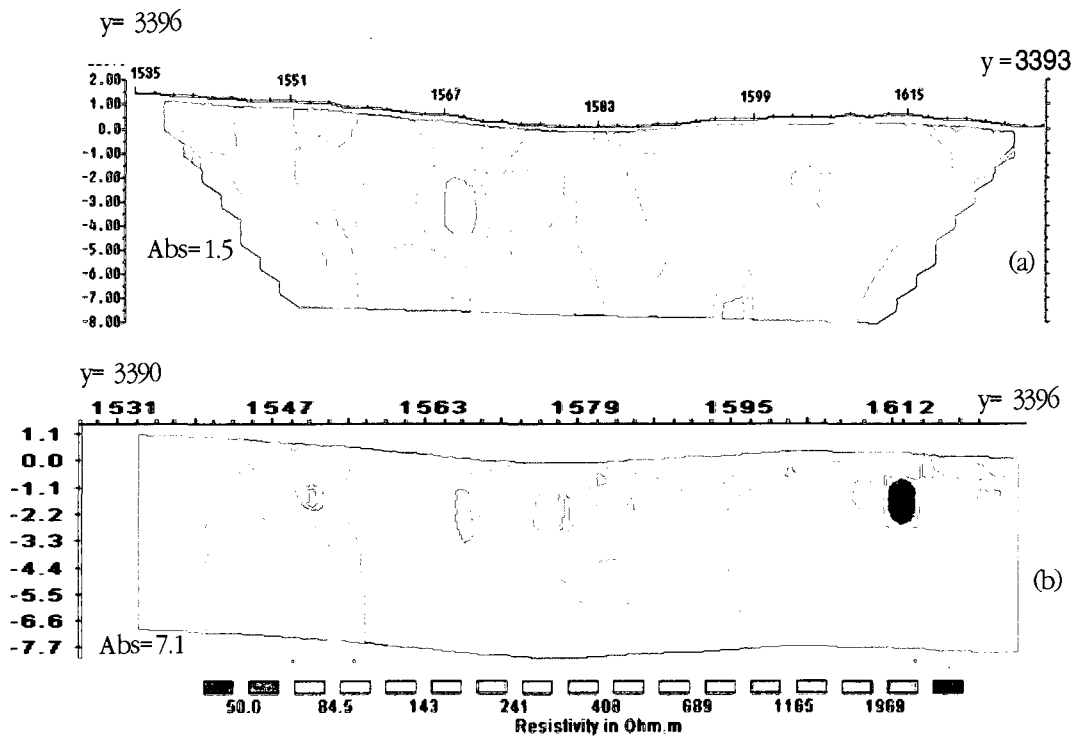


Figure 7.7 : Comparaison entre une section obtenue par inversion 2D (a) et celle obtenue par inversion 3D (b); cas du levé P3W-E

Dans le cas du levé, P3W-E (figure 7.7), la corrélation entre les représentations 2D et 3D est assez bonne du côté ouest par rapport au côté est. La structure résistive de l'extrême ouest ainsi que l'anomalie conductrice sous le point 1569 m apparaissent sur les deux sections. Vers le côté est, on constate que la coupe 3D montre quelques anomalies résistives ($1100 \Omega.m$) sous les points 1583 m et 1615 m. Ces anomalies n'apparaissent pas dans le cas de l'inversion 2D. Notons que les coupes présentées sont décalées vers le sud pour le côté ouest. D'après cette analyse, il semble que les grosses structures sont similaires pour les deux types d'inversion. Quelques légères différences apparaissent par endroit et peuvent être attribuées soit à des effets 3D soit au processus d'inversion. Cela indique que les structures mises en évidence directement sous les levés 2D résultent dans la majorité des cas de variations de résistivité au droit du profil.

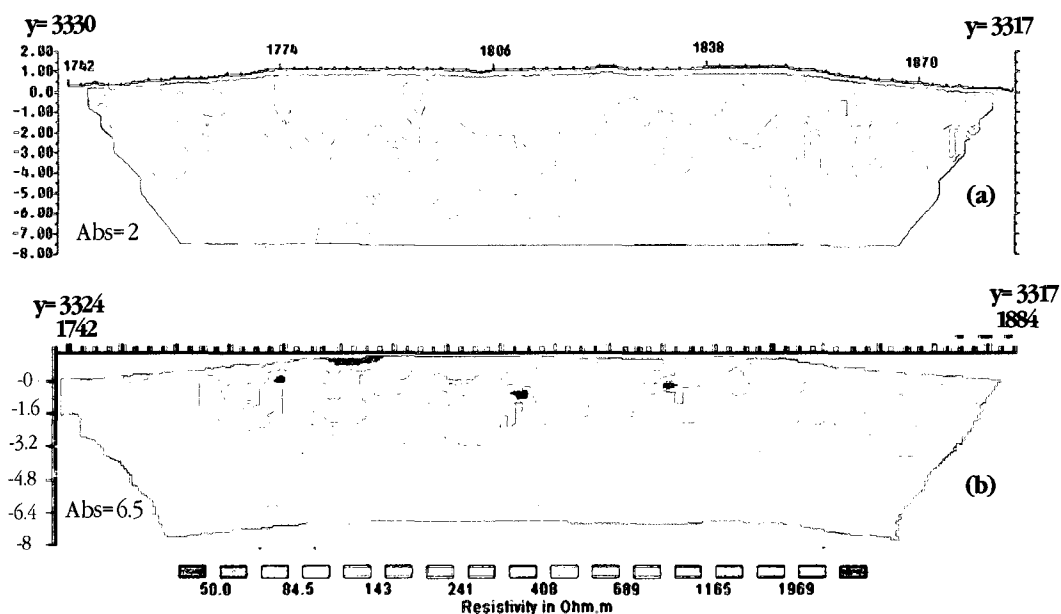


Figure 7.8 : Comparaison entre la section obtenue par inversion 2D (a) et celle obtenue par inversion 3D (b) ; cas du levé L2

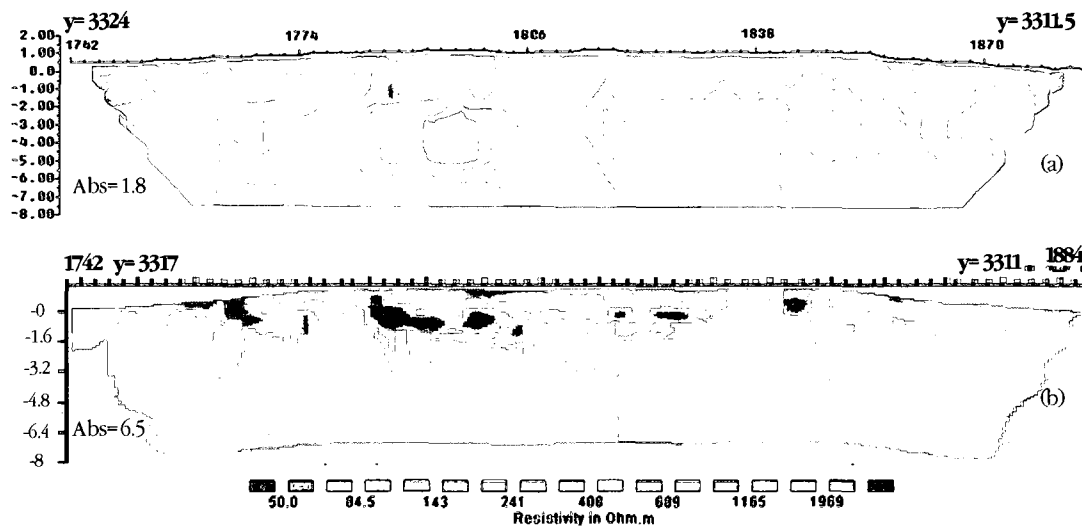


Figure 7.9 : Comparaison entre la section obtenue par inversion 2D (a) et celle obtenue par inversion 3D (b) ; cas du levé L3

Les figures 7.8 et 7.9 montrent une comparaison des sections 2D et 3D correspondant à la zone II. L'inversion 3D (figures 7.8b et 7.9b) a permis de détecter une couche

résistive ($1500 \Omega.m$) en surface d'une épaisseur d'environ 2 m. Cette couche apparaît plus conductrice ($900 \Omega.m$) dans le cas de l'inversion 2D (figure 7.8 a et 7.9 a). En dessous de cette couche relativement résistive, les deux types d'inversion montrent des résultats similaires soit une couche conductrice et homogène d'une résistivité variant entre $300 \Omega.m$ à $400 \Omega.m$. L'interface entre les deux couches (figure 7.8 a et 7.9 a) correspond probablement à un niveau de la halde où la machinerie a circulé entraînant la compaction du niveau inférieur (plus de rétention d'eau), alors que la couche superficielle est moins dense (retenant moins d'eau).

Du côté ouest (figures 7.8 et 7.9), les deux types d'inversion induisent des structures assez similaires. Les sections 2D montrent par endroits quelques anomalies conductrices non détectées dans le cas d'inversion 3D et vice versa.

Les faibles différences entre les sections 2D et 3D sont attribuées à des variations latérales ou à des effets du processus d'inversion (artéfacts numériques). Globalement, les deux types d'inversion montrent pratiquement les mêmes distributions de résistivité. Cela semble indiquer que la résistivité en proche surface de la halde varie peu perpendiculairement aux profils (dans la zone investiguée).

7.2.3 Inversion 2D et interprétation des données de chargeabilité en proche surface

Les pseudo-sections de la chargeabilité mesurées montrent des valeurs apparentes négatives au niveau des deux premiers mètres (3 premiers niveaux de la pseudo-section, cf. construction des pseudo-sections, chapitre 2). En général, des mesures avec des chargeabilités apparentes négatives sont possibles contrairement au cas de la résistivité où les valeurs négatives sont causées par des problèmes d'acquisition (faible rapport signal/bruit ou des effets 3D). L'annexe 7.1 montre une revue de la littérature et une simulation 1D et 2D correspondant à un modèle fictif de couches qui donne des chargeabilités apparentes négatives.

Dans notre cas, les 3 premiers niveaux des pseudo-sections montrent un comportement complexe de la décroissance de la chargeabilité (courbe de décharge). La fonction de décroissance de la chargeabilité avec le temps n'est pas monotone (changement de signe au cours du temps pour le même point de mesure). La figure 7.10 montre des exemples de courbes de décroissance de la chargeabilité avec le temps (voir principe de mesure de la chargeabilité, chapitre 2).

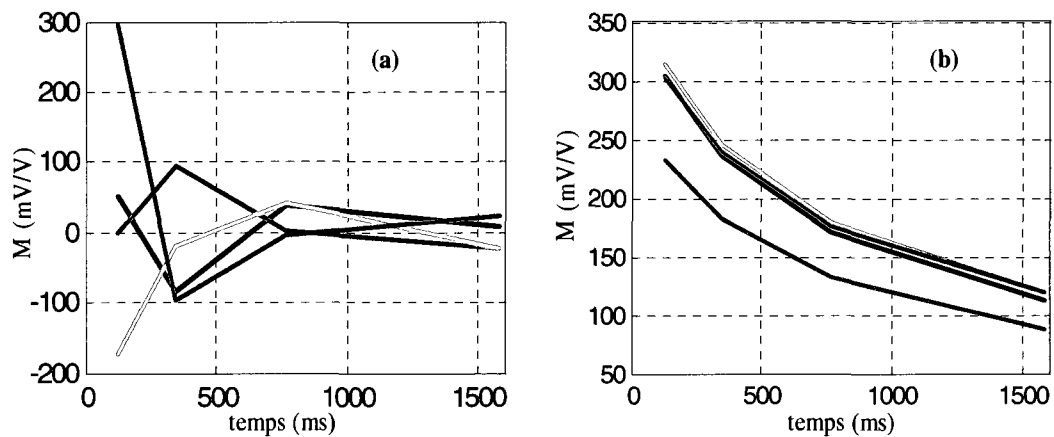


Figure 7.10 : Comparaison des comportements de la chargeabilité avec le temps pour différents niveaux : (a) courbes de décroissance de la chargeabilité pour 4 points de mesures situés sur les 3 premiers niveaux; (b) courbes de décroissance de la chargeabilité pour 4 points de mesures situés sur les niveaux plus profonds (> 4)

Les trois premiers niveaux de l'ensemble des mesures effectuées pour l'investigation de la proche surface montrent un comportement complexe (non monotone) tel que montré dans la figure 7.10a. Ce comportement est probablement d'origine instrumentale. Les niveaux des pseudo-sections de chargeabilité plus profondes ($n > 4$) montrent un comportement normal (qui correspond à une courbe de décharge après la coupure du courant injecté dans le sol) tel que montré dans la figure 7.10b.

La figure 7.11 montre un exemple de variation de la chargeabilité apparente globale (calculée à partir des chargeabilités partielles, équation 6.2) pour les 4 premiers

niveaux (des levés P1W-E, zone I et L1, zone II). Cette variation est très forte le long des deux profils avec une alternance de valeurs positives (80 ms) et négatives (-20 ms, niveau 2 en rouge). Le premier niveau est plus stable avec des valeurs qui oscillent autour de la valeur nulle. La distribution de la résistivité varie d'un endroit à l'autre (figures 7.2) alors que le comportement de la chargeabilité sur les 3 premiers niveaux est pratiquement le même pour l'ensemble des levés (figures 6.8 et 6.10). Cela appuie l'hypothèse suggérant que ce comportement de chargeabilité soit d'origine instrumentale.

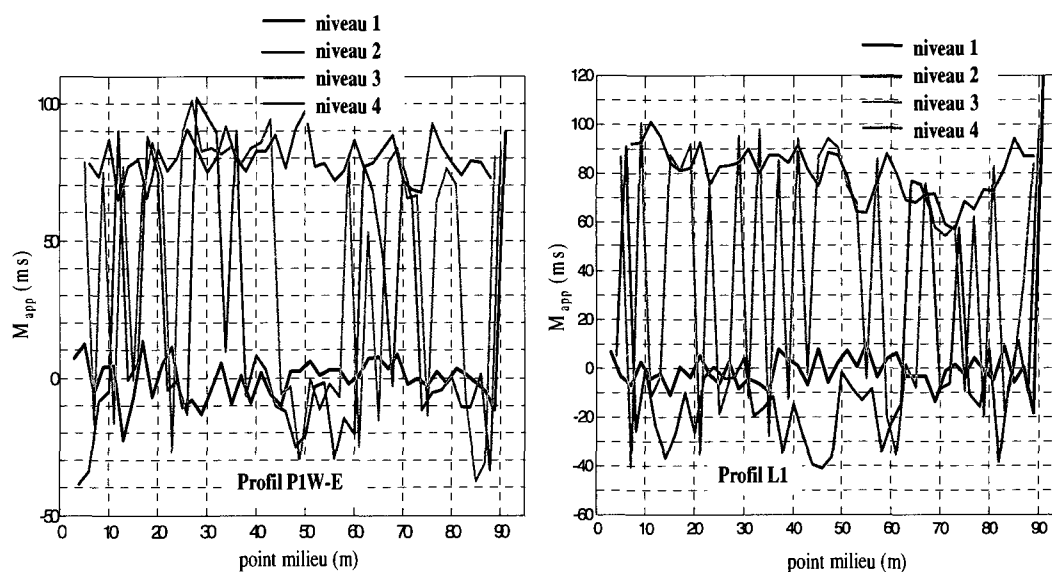


Figure 7.11 : Variation de la chargeabilité apparente globale le long de deux profils pour les quatre premiers niveaux des pseudo-sections (cas des levés P1W-E et L1)

Toutes les mesures montrant une chargeabilité partielle négative sur l'une des fenêtres temporelles d'intégration ont été supprimées avant l'inversion des données. Cela implique que les données sur les deux premiers mètres dans les sections montrées à la figure 7.12 sont obtenues par extrapolation et ne reflètent pas nécessairement des structures réelles (le logiciel Res2Dinv prolonge le modèle vers les premiers niveaux lorsque que les données de ces derniers sont supprimées).

Le levé P4W-E a été réalisé à l'aide du système ABEM. Faute de temps, seulement 191 lectures sont effectuées au lieu de 356 possibles (aucune lecture n'a été prise dans les 3 premiers mètres).

La figure 7.12 montre les sections de chargeabilité (zone I) obtenues par inversion après suppression des valeurs négatives. L'analyse de ces sections montre que la chargeabilité est assez élevée avec une variation globale entre 50 à 110 ms. Le profil P4W-E (figure 7.12) montre des chargeabilités un peu plus élevées et plus uniformes, autour de 100 ms. Ces résultats suggèrent une dissémination importante de la minéralisation au sein des stériles. La partie ouest des profils présente des anomalies de plus faibles chargeabilité, soit autour de 50 ms. L'explication la plus probable serait une faible concentration de la minéralisation dans cette partie. D'un autre côté, cette zone est moins compactée par rapport au côté est et les mesures de la résistivité ont montré des valeurs plus élevées ($\rho \geq 1000 \Omega.m$). Cela indique que la teneur en eau est plus faible à cet endroit et elle est probablement insuffisante pour générer des réponses PP similaires à celles observées sur le côté est.

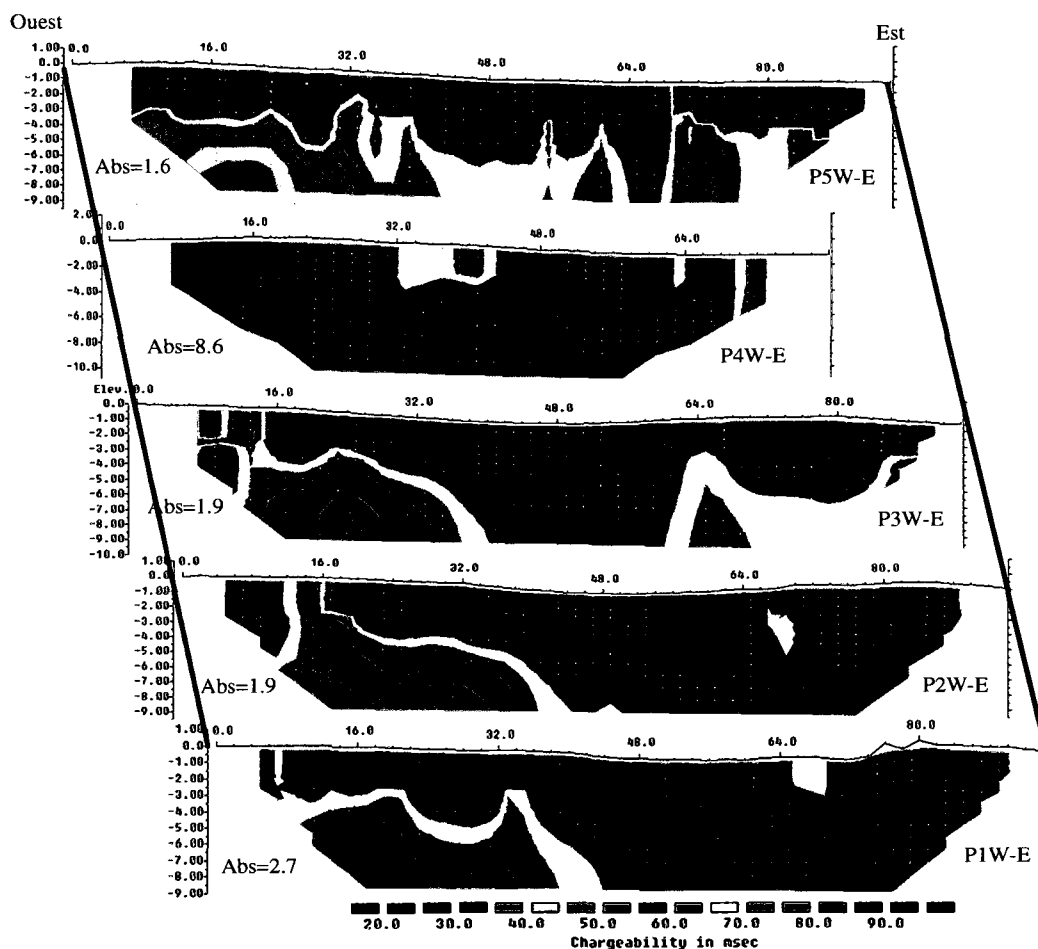


Figure 7.12 : Réponses calculées en chargeabilité, données de la zone I, les mesures sont reproduites avec les réponses calculées avec des faibles RMS. La couleur rouge indique les fortes chargeabilités.

La distribution de la chargeabilité est en général différente de celle de la résistivité. Quelques fois on constate des comportements similaires, mais ils sont peu fréquents. La figure 7.13 montre des distributions de résistivité et de chargeabilité qui semblent être corrélées. Les anomalies A et A' correspondent à un endroit résistif et peu chargeable. Cela pourrait être expliqué par un faible degré de saturation à cet endroit. Ce comportement est contraire aux mesures effectuées au laboratoire qui montrent que la chargeabilité décroît avec le degré de saturation (figure 5.12). Cependant, les

mesures effectuées au laboratoire ont été faites pour des degrés de saturation supérieurs à 26 %. Il semble exister une valeur critique de saturation ($S_r < 26\%$) où la chargeabilité commence à décroître pour s'annuler vers les très faibles degrés de saturation. Cette zone du levé pourrait correspondre à un degré de saturation plus faible que cette valeur critique.

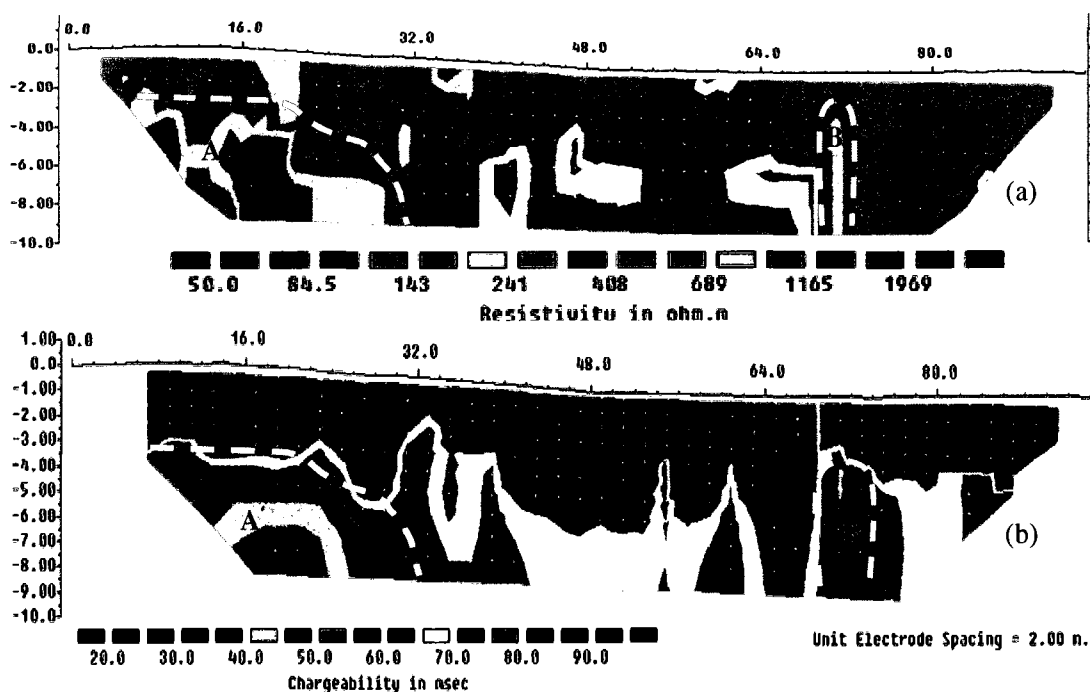


Figure 7.13 : (a) section de résistivité (b) section de chargeabilité. Les anomalies A et A' indiquent un exemple où la résistivité et la chargeabilité sont corrélées (cas du levé P5W-E)

La figure 7.14 montre les sections de chargeabilité pour les levées effectuées sur la zone II (voir la figure 6.5 pour la localisation). Comme pour les mesures dans la zone 1, toutes les mesures montrant une chargeabilité partielle négative sur l'une des fenêtres temporelles d'intégration ont été supprimées avant l'inversion des données. Cela implique que les données sur les deux premiers mètres dans les sections montrées dans la figure 7.14 sont obtenues par extrapolation et ne reflètent pas

nécessairement des structures réelles (le logiciel Res2Dinv prolonge le modèle vers les premiers niveaux alors que les données de ces derniers sont supprimées).

On note sur la figure 7.14 que les ordres de grandeur de la chargeabilité dans la zone II sont assez semblables à ceux de la zone I (figure 7.12). La partie ouest présente des valeurs de chargeabilité légèrement inférieures à la partie est. Les données de résistivité (figure 7.3) sont également plus élevées sur la partie ouest que la partie est. En considérant les comportements de la résistivité et chargeabilité, on peut expliquer les chargeabilités moindres à l'ouest par une teneur en eau insuffisante pour générer un effet PP important, contrairement à la partie est qui est plus conductrice et plus chargeable. Comme dans le cas de la résistivité, la corrélation latérale de chargeabilité pour les 4 sections de la figure 7.14 est assez bonne.

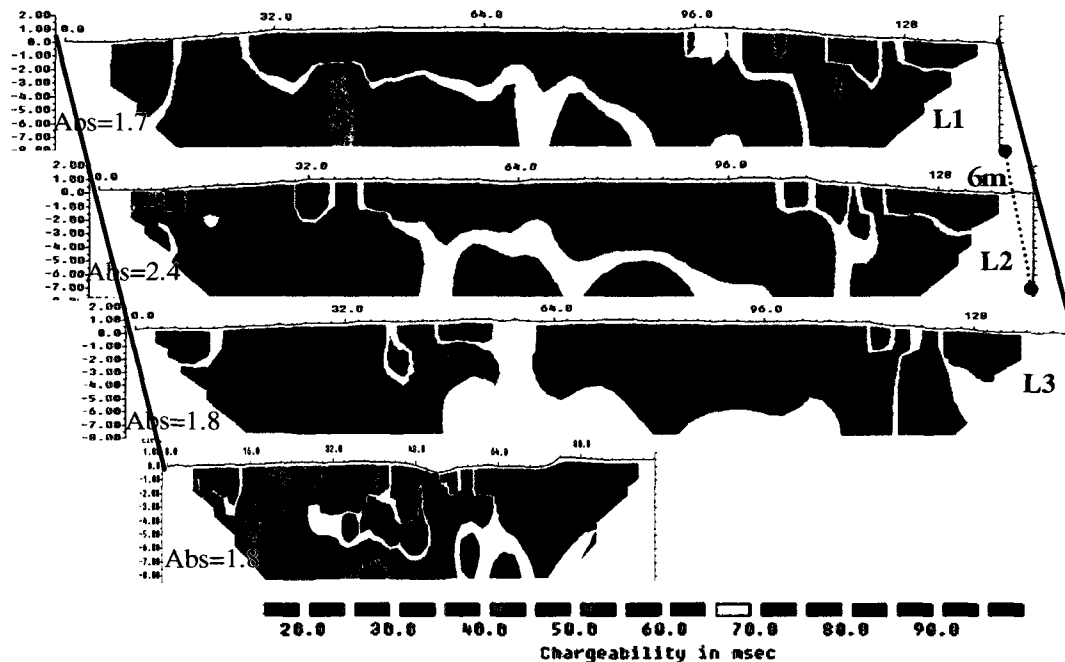


Figure 7.14 : Réponses calculées en chargeabilité, mesures de la zone II; les couleurs jaune et rouge indiquent les fortes chargeabilités, les couleurs vertes indiquent des chargeabilités moindres. Les erreurs de reproduction des mesures sont faibles (<2.5%)

7.3 Traitement et interprétation des mesures PP pour l'investigation en profondeur

7.3.1 Inversion 2D et interprétation des mesures de résistivité

Dans le but d'investiguer la structure de la halde en profondeur, 9 profils PP ont été réalisés en 2005 par la compagnie Abitibi Géophysique (profils en vert, figure 7.15). Ces données ont été acquises en utilisant le dispositif dipôle-dipôle avec une longueur de dipôle de 20 m et une distance dipôle émetteur – dipôle récepteur n.a (n variant de 1 à 10, cf. chapitre 2, paragraphe 2.1.4). La distance inter-profils est de l'ordre de 40 m. Au cours de l'été 2008, nous avons réalisé 5 autres profils PP (profils en rouge sur la figure 7.15). La configuration adoptée est celle d'un dipôle-dipôle avec des dipôles de 10 m et des séparations de 1 à 25 et de 1 à 16. La distance inter-profil est de 20 m.

La figure 7.16 montre l'emplacement ainsi que la dénomination des profils utilisée dans le reste du chapitre. La figure 7.17 montre une coupe de la halde suivant la ligne AH1H2.



Figure 7.15 : Plan montrant des profils d'investigation en profondeur au niveau de la surface de la halde (voir aussi figures 6.4 et 6.5)

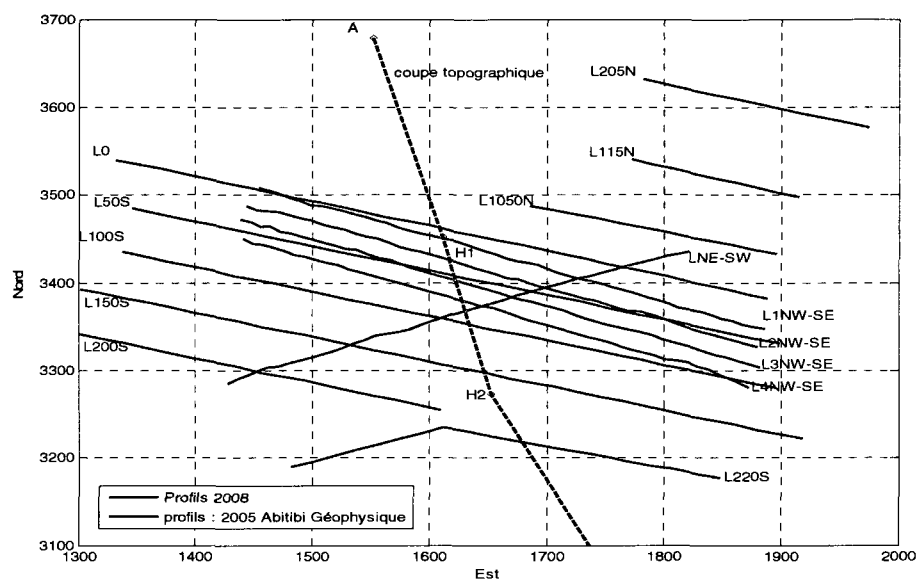


Figure 7.16 : Localisation des profils montrés sur la figure 7.17 avec leur dénomination

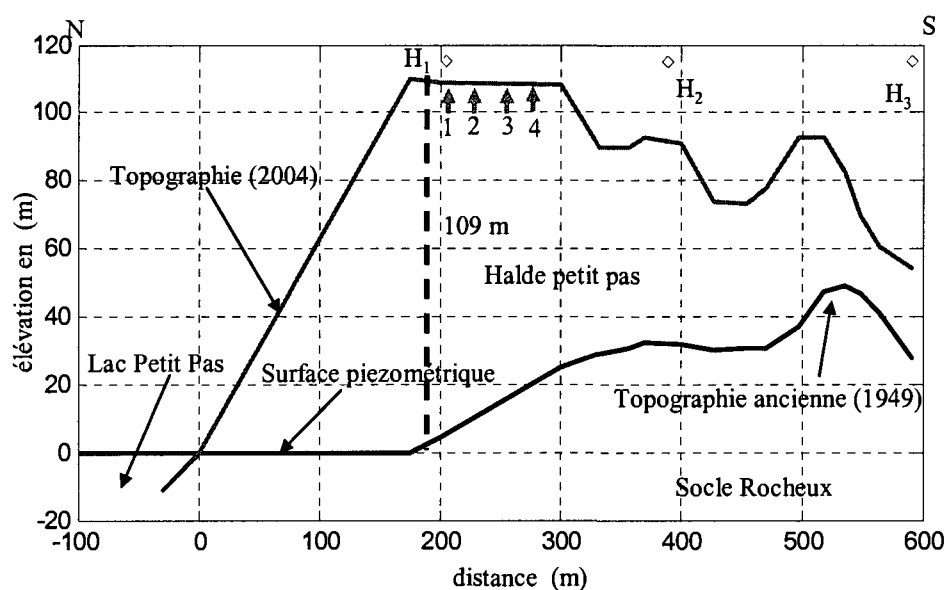


Figure 7.17 : Comparaison de la topographie ancienne (1949) et actuelle (2004) au niveau de la coupe schématisée dans les figures 7.15 et 7.16 (adapté du plan de localisation et systèmes d'écoulement souterrains) H1, H2 et H3 représentent les positions des forages réalisés sur la halde. Les chiffres 1, 2, 3, 4 indiquent respectivement les points d'intersections de la coupe topographique avec les levés L1NW-SE, L2NW-SE, L3NW-SE et L4NW-SE

Les points d'intersection entre les profils et la position de la coupe indiquent que le socle rocheux se trouve sous les levés PP à au moins 80 m de profondeur (pour la partie centrale des profils). Cela indique qu'avec la profondeur d'investigation obtenue dans notre cas (de l'ordre de 60 m), nous n'atteignons pas le socle rocheux. Ceci est valable surtout au niveau de la ligne centrale puisque nous n'avons pas la topographie complète de la surface avant la construction de la halde.

Comme dans le cas des données de la proche surface, nous avons testé quatre séquences de traitement afin de séparer les effets provenant des propriétés électriques des stériles des autres effets provenant au processus numérique d'inversion. La séquence de traitement principale est la même que celle utilisée dans le cas des

mesures de la proche surface. Pour chaque test, on change un paramètre d'inversion tout en fixant les autres. Ce test est effectué dans le cas des profils L4NW-SE et LNE-SW (localisés au plan de la figure 7.15 et 7.16).

✓ Séquence de traitement 1

- Élimination des résistivités négatives (2 lectures dans le cas du profil L4NW-SE).
- Élimination des résistivités dont l'écart-type dépasse 150 % (9 lectures dans le cas du L4NW-SE).
- Facteur d'amortissement : une valeur de 0.2 a été utilisée puisque les données sont relativement bonnes;
- Facteur filtre ("Ratio of the vertical/horizontal filter weight") : une valeur de 1.5 a été utilisée en considérant que les anomalies de résistivité se prolongent verticalement plus que latéralement.
- Type de la grille : choix du maillage fin.
- Nombre de nœuds entre deux électrodes adjacentes : 4.
- Méthode de modélisation directe : éléments finis.
- Type d'inversion : inversion robuste, 5 itérations.
- Suppression des mesures qui présentent un grand écart avec les résistivités apparentes de la pseudo-section calculée (une limite de 35% a été choisie pour ce profil conduisant à la suppression de 9 mesures).
- Ré-inversion avec 8 itérations.

✓ Séquence de traitement 2

La séquence de traitement 2 est la même que la séquence numéro 1, mais en utilisant la méthode des moindres carrées au lieu de la méthode robuste. Dans ce cas, 12 lectures sont supprimées pour une limite RMS de 12%.

✓ **Séquence de traitement 3**

La séquence de traitement numéro 3 est la même que la séquence numéro 1, mais en utilisant une grille moins fine ("Normal mesh") et 2 nœuds entre deux électrodes adjacentes. Dans ce cas, 15 lectures sont supprimées pour la limite de 50%.

✓ **Séquence de traitement 4**

La séquence de traitement numéro 4 est la même que la séquence numéro 1, mais en donnant plus de poids aux variations de résistivité latérales (plutôt que verticales; "Ratio of the vertical/horizontal filter weight": 0.8. Dans ce dernier cas, 10 lectures sont supprimées pour la limite de 35%.

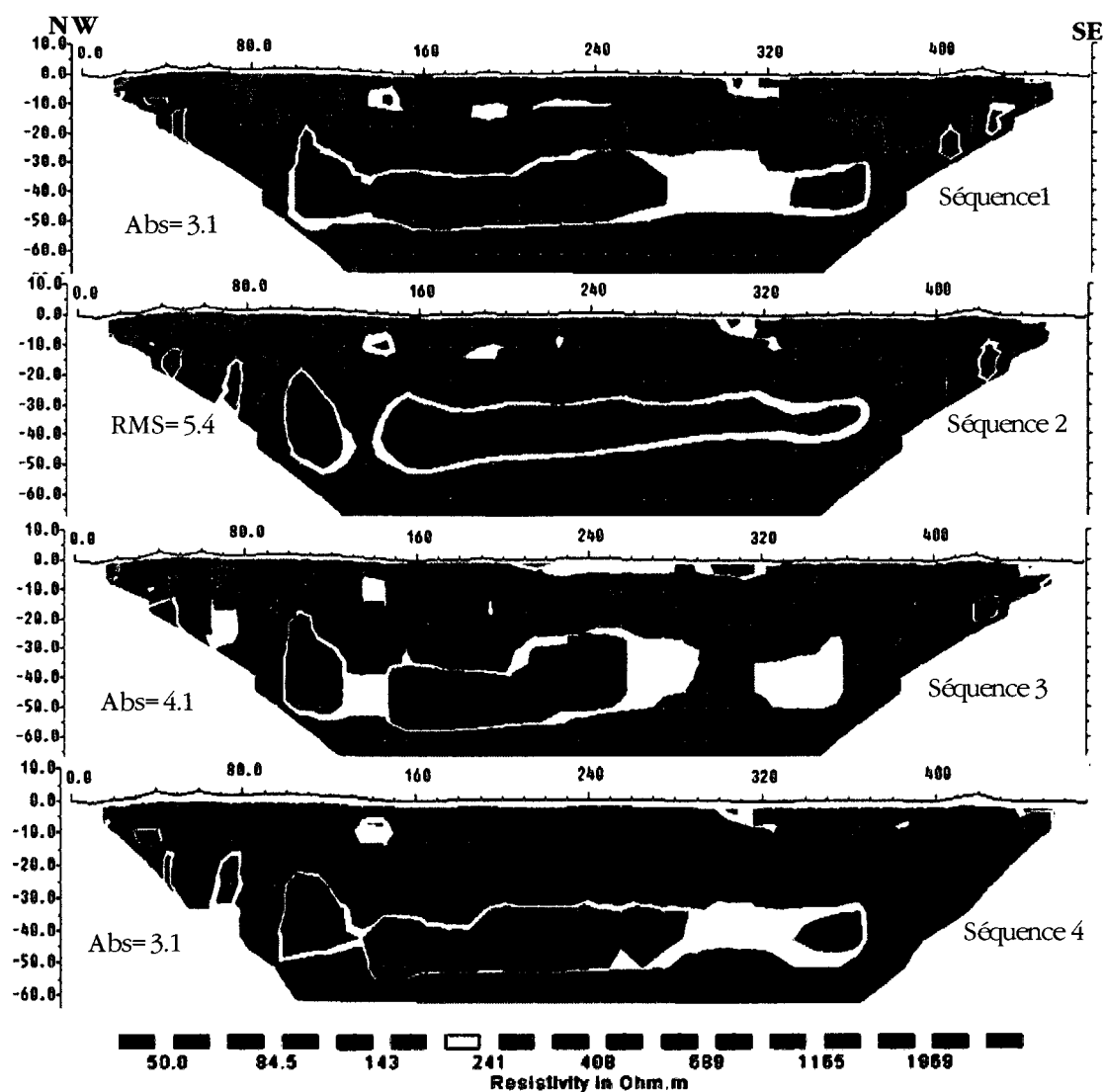


Figure 7.18 : Résultats des calculs d'inversion pour les quatre séquences (décrites dans le texte) appliquées au cas du profil L4NW-SE.

L'analyse de la figure 7.18 montre que les quatre séquences de traitement donnent des résultats similaires avec quelques légères différences au niveau de la taille et la forme de certaines anomalies. Par exemple, la couche conductrice, qui apparaît à 30 m de profondeur, est plus homogène dans le cas d'une inversion à l'aide de la méthode des moindres carrés que le cas d'une inversion robuste. La couche résistive en

profondeur (environ 50 m) apparaît plus mince et plus allongée vers le nord-ouest pour les deux dernières séquences de traitement.

À nouveau notre objectif consiste à déterminer des structures de résistivité avec des limites les plus nettes possible. Pour cette raison, nous avons choisi la séquence de traitement numéro 1 (méthode d'inversion L1 et un maillage fin) pour le traitement de toutes les mesures de résistivité réalisées pour l'investigation en profondeur.

La figure 7.19 montre les réponses calculées des mesures de résistivité pour les levés parallèles, L1NW-SE, L2NW-SE et L4NW-SE (localisés sur la figure 7.15). La figure 7.20 montre la réponse calculée de la mesure de résistivité du profil LNE-SW, qui coupe les autres profils respectivement aux points M, N et O (cf figures 7.19 et 7.20). Les mesures sont reproduites par les réponses calculées à une erreur quadratique moyenne inférieure à 7.5 %. L'analyse des réponses calculées (figures 7.19 et 7.20) montre la présence de 3 couches géoélectriques majeures sur les 60 m de profondeur investigués. Tout d'abord, on note la présence d'une couche superficielle, hétérogène, d'une épaisseur d'environ 30 m avec une résistivité assez élevée variant entre 300 $\Omega.m$ à 900 $\Omega.m$. À l'intérieur de cette couche, nous distinguons quelques anomalies soit résistives soit conductrices. Les structures A, B, C, E indiquées respectivement au niveau des profils L1NW-SE, L2NW-SE, L4NW-SE et LNE-SW (figures 7.19 et 7.20) montrent des exemples d'anomalies résistives (environ 2000 $\Omega.m$). La structure D montre un exemple d'anomalie conductrice (50 $\Omega.m$) entourée d'une anomalie plus résistive (1500 $\Omega.m$) à 10 m de profondeur au point 170 m sous le profil L1NW-SE.

En dessous de la couche hétérogène, les sections montrent la présence d'une couche conductrice (entre 80 et 250 $\Omega.m$) d'une épaisseur estimée à 25 m. Cette couche est mise en évidence sous tous les profils réalisés. Différentes hypothèses peuvent expliquer la présence de cette bande conductrice. Elles sont liées aux conditions de stockage et l'origine des stériles à l'époque de la construction de cette partie de la halde. Tout d'abord, il se peut que la granulométrie à cette époque de construction contienne plus de particules fines retenant plus d'eau. La deuxième hypothèse qui peut

expliquer la chute de la résistivité de cette couche serait une minéralisation plus importante dans les stériles. Ceci pourrait donner naissance à un fluide interstitiel plus riche en ions métalliques. Cette dernière hypothèse est appuyée par les mesures au laboratoire sur des stériles saturées avec des fluides de conductivité électrique différente. La mesure avec un fluide interstitiel conducteur (5.67 mS/cm) a montré que la résistivité des stériles varie entre 16 à 25 $\Omega.m$ en fonction du dispositif de mesure alors que l'utilisation d'un fluide plus résistif (0.58 mS/cm) donne des résistivités plus élevées variant entre 83 $\Omega.m$ et 135 $\Omega.m$. Cependant, cette couche pourrait contenir des inclusions résistives qui sont non résolues (indétectables) à cause de la diminution du pouvoir de résolution avec la profondeur. En effet, pour des écartements très grands entre le dipôle émetteur et le dipôle récepteur par rapport au rayon des structures résistives, la résistivité des couches de la halde paraît homogène. Ce phénomène physique est appelé effet d'homogénéisation (Rey, 2005).

La 3^{ème} couche distinguée a une résistivité qui paraît homogène et élevée d'environ 2000 $\Omega.m$. Cette couche pourrait aussi inclure des structures conductrices qui ne se résolvent pas à cause de l'effet d'homogénéisation. Elle est non limitée en profondeur. Cependant, l'analyse de la distribution de la sensibilité (figure 7.21), calculée à l'aide du logiciel Res2Dinv, montre que cette sensibilité est faible à ce niveau de profondeur (≥ 50 m). Cela indique qu'avec les paramètres d'acquisition utilisés (cf. chapitre 6), les mesures sont peu sensibles à des variations de résistivité à ce niveau de profondeur. Cela limite les interprétations possibles sur la nature de cette 3^{ème} couche. D'un autre côté, la profondeur du socle rocheux sous les 4 profils est plus grande que 85 m. Donc, cette couche résistive ne correspondrait pas au socle rocheux mais bien à des stériles d'une nature donnée. Comme cette couche correspond au début de l'exploitation de la mine, elle est probablement composée de stériles grossiers extraits à la surface pour atteindre le minerai.

Le levé LNE-SW (figure 7.20) coupant les profils L1NW-SE, L2NW-SE et L4NW-SE respectivement aux points M, N et O montre des résistivités et des structures

similaires à celles observées sur les autres profils. Tout d'abord, on note la présence des anomalies résistives (E et F) vers le côté sud-ouest prolongées jusqu'à 30 m de profondeur. Mise à part ces anomalies résistives, on trouve des résistivités similaires aux autres profils avec des valeurs variant de 300 $\Omega.m$ à 1500 $\Omega.m$. La couche conductrice (environ 180 $\Omega.m$) à 30 m de profondeur apparaît plus homogène que sous les autres profils.

Le coté sud-ouest montre la présence d'une structure inclinée résistive. Cet endroit correspond à la limite de la halde où on note la présence de quelques tas de stériles non compactés et les deux dernières électrodes sont complètement implantées dans la forêt. Ces informations indiquent que cette couche correspond probablement au socle rocheux.

Les sections des profils parallèles et celle du profil LNE-SW montrent une bonne corrélation aux points d'intersection.

Les sections de résistivité sous les mêmes profils pour n variant de 1 à 16 (profondeur d'investigation d'environ 40 m) sont données dans l'annexe 7.2 (sur CD joint au mémoire).

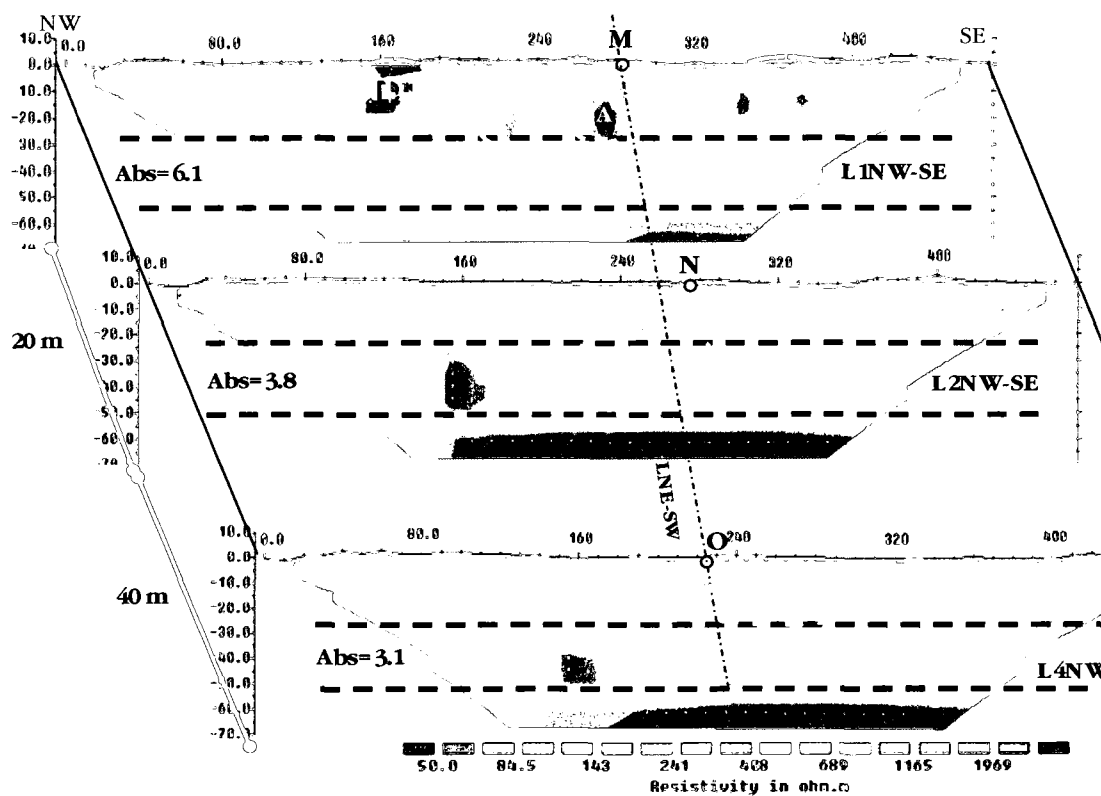


Figure 7.19 : Sections de résistivité interprétées pour les 3 levés parallèles L1NW-SE, L2NW-SE, L4NW-SE. La couleur rouge indique les zones conductrices alors que le bleu foncé indique les zones résistives. Les lignes en trait tireté noir délimitent la couche conductrice

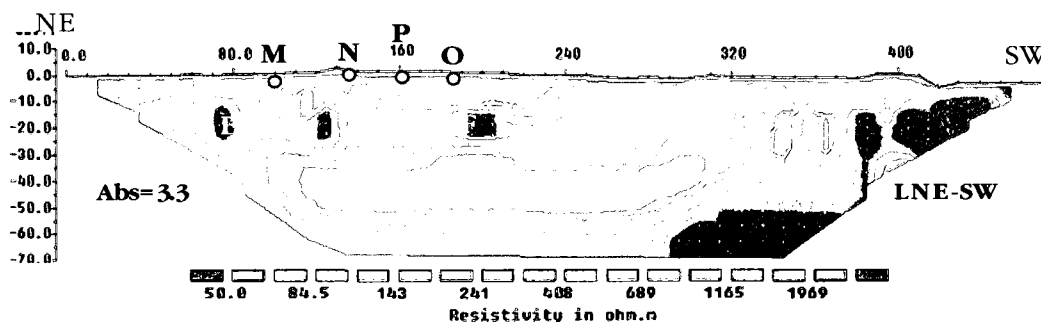


Figure 7.20 : Réponse de la résistivité calculée pour le profil LNE-SW. Les points M, N, O représentent les intersections avec les autres profils montrés dans la figure 7.21. Les lettres E et F indiquent des exemples d'anomalies résistives.

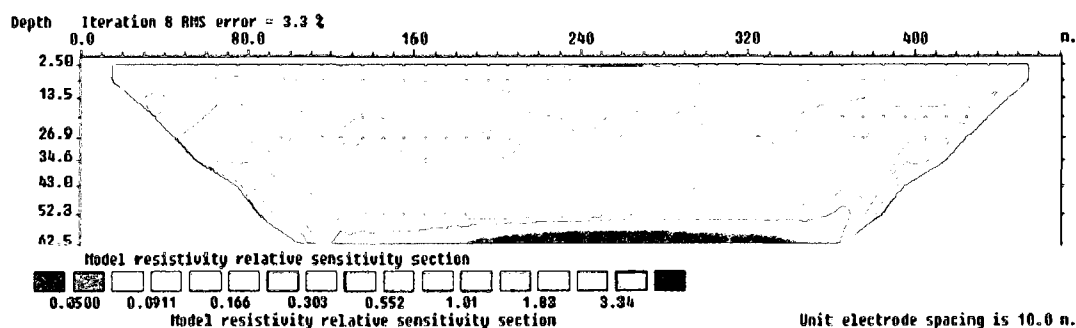


Figure 7.21 : Exemple de distribution de la sensibilité, calculée à l'aide du logiciel Res2Dinv dans le cas du profil L4NW-SE

La figure 7.22 montre des levés de résistivité réalisés en 2005 par la compagnie d'Abitibi Géophysique. L'emplacement de ces levés est proche de ceux réalisés en 2008 (figure 7.15). La profondeur d'investigation varie entre 50 et 60 m en fonction de l'espacement possible entre le dipôle émetteur et récepteur. L'analyse des sections 2D montre une première couche hétérogène et résistive (entre 500 et 2000 $\Omega.m$) avec quelques anomalies conductrices (de 100 à 200 $\Omega.m$) en proche surface. Les anomalies situées sous les levés L50S entre 320 m et 480 m ainsi que sous L0 entre les points 340 m et 360 m sont des exemples de ces structures conductrices en surface.

L'épaisseur de cette 1^{ère} couche varie entre 20 à 25 m. La 2^{ème} couche décelée est plus conductrice (entre 100 et 200 $\Omega.m$) notamment au niveau de la partie nord ouest. Elle présente des discontinuités plus marquées au niveau des profils L100S et L150S. Cette couche conductrice est non limitée en profondeur sur la partie nord ouest et possède une épaisseur d'environ 20 m au niveau de la partie sud-est. La partie sud-est montre la présence d'une troisième couche plus résistive (environ 2000 $\Omega.m$) et non limitée en profondeur.

En conséquence, les levés de résistivité de 2005 montrent une distribution de résistivité similaire à celle des levés de 2008. Cela montre la bonne répétitivité des mesures ainsi que la stabilité des propriétés électriques.

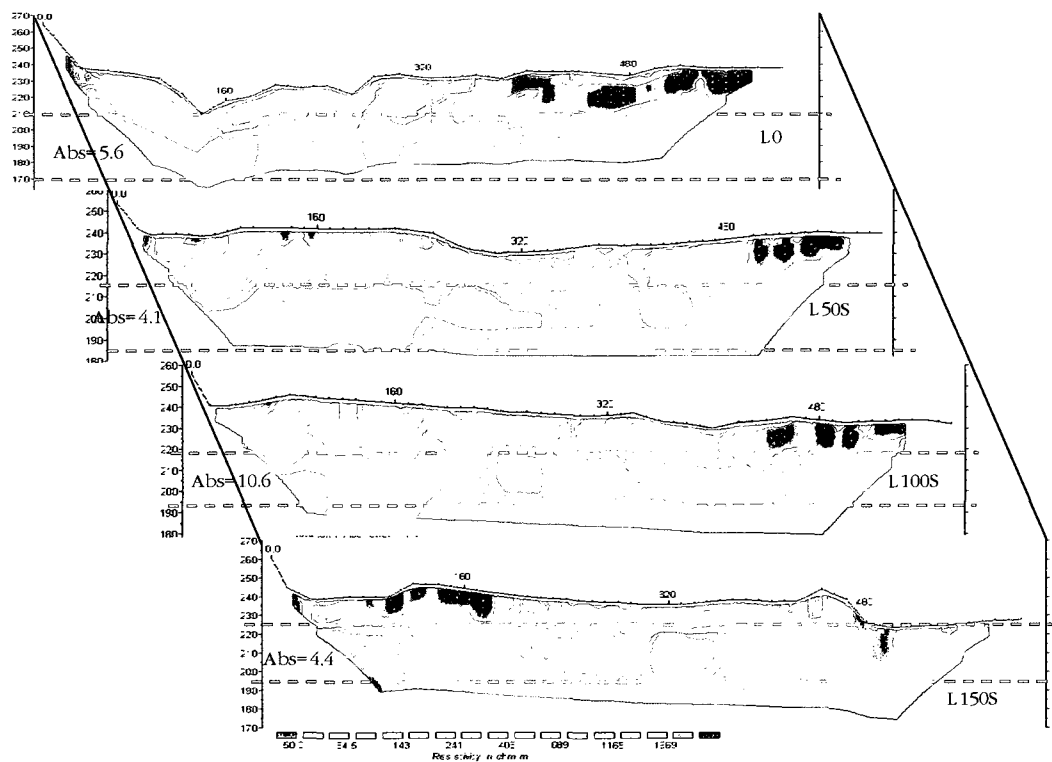


Figure 7.22 : Exemple de profils électriques réalisés en 2005 (adapté du rapport LGAP 2005 04, Chouteau et al, 2005). Les lignes en trait tireté rouge délimitent la couche conductrice

7.3.2 Inversion 3D des résistivités

Après l'inversion 2D, nous avons construit un fichier (avec un format lisible pour le logiciel d'inversion Res3Dinv (Loke et al, 1996) composé des données des 4 profils parallèles (L1NW-SE, L2NW-SE, L3NE-SW et L4NW-SE). Ce fichier est composé des coordonnées de chacune des électrodes suivies des mesures. Les électrodes se situent sur une grille non uniforme (trapézoïdale). Au total, 2843 lectures sont retenues pour l'inversion 3D. Le fichier construit est donné sur le CD joint au mémoire (appendice 7.3)

Les paramètres d'inversion ainsi que le maillage adoptés sont pratiquement identiques à ceux utilisés dans le cas de l'inversion 2D. La méthode robuste avec l'algorithme d'inversion de Gauss Newton est utilisée pour le processus d'inversion.

La figure 7.23 montre des coupes verticales prélevées automatiquement à l'aide des fonctions graphiques de Res3Dinv. Malheureusement, elles sont trop décalées par rapport aux positions des levés 2D pour réaliser une comparaison directe avec les sections 2D. Ces coupes montrent une distribution de résistivité relativement similaire aux résultats obtenus par inversion 2D. La première couche d'une épaisseur d'environ 24 m est hétérogène d'une résistivité variant entre 500 $\Omega.m$ à 1500 $\Omega.m$ avec la présence parfois de quelques zones conductrices en proche surface. La deuxième couche détectée, d'une épaisseur d'environ 25 m, est plus conductrice et homogène avec des résistivités variant entre 50 $\Omega.m$ à 400 $\Omega.m$ (figure 7.23, délimitée par les lignes en trait). Du côté nord-ouest, cette deuxième couche est non limitée en profondeur contrairement au côté sud-est où l'on constate l'apparition de la couche résistive à une profondeur d'environ 48 m.

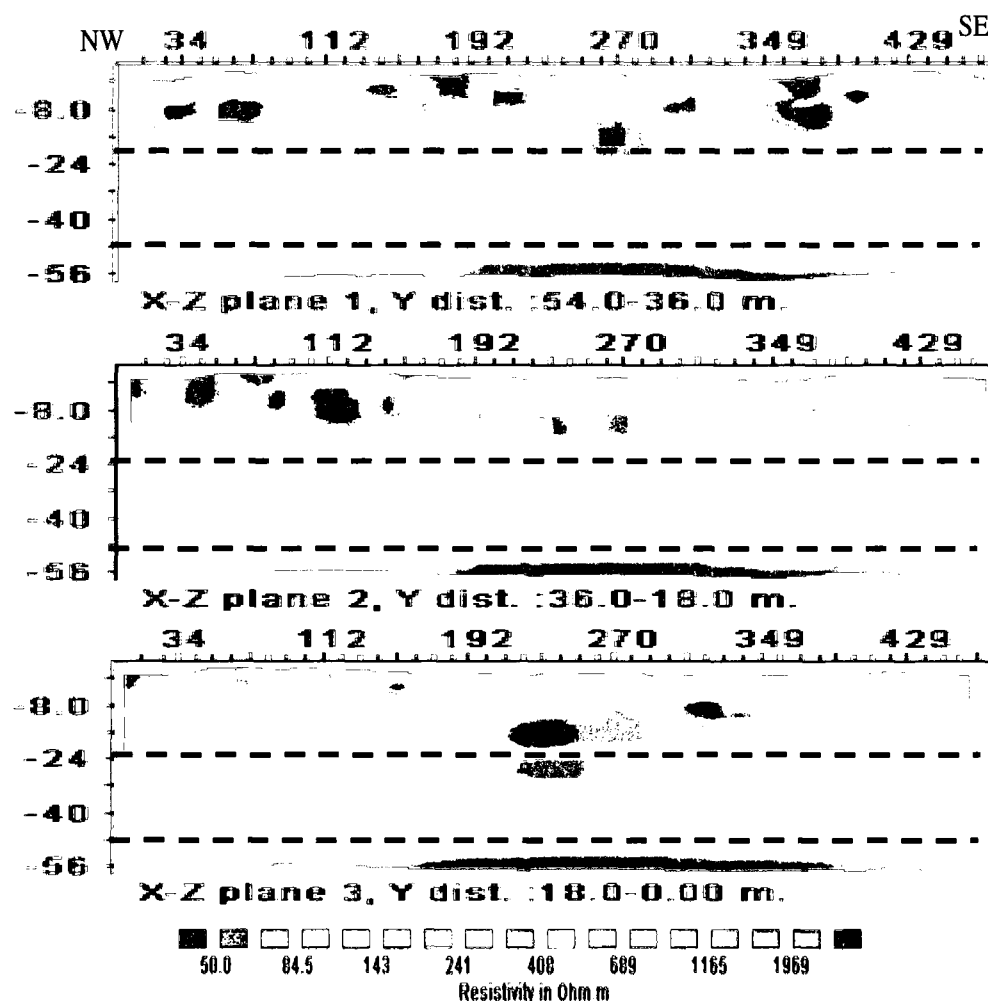


Figure 7.23 : Coupes verticales prélevées du modèle de résistivité 3D, l'erreur quadratique moyenne de reproduction des mesures est 5.5 après 10 itérations. Les lignes en trait tireté noir délimitent la couche conductrice

7.3.3 Inversion 2D des données de chargeabilité

La figure 7.24 montrent les sections obtenues par inversion des mesures de chargeabilité pour les 3 profils parallèles (L1NW-SE, L2NW-SE et L4NW-SE). La figure 7.25 montre la section du profil LNE-SW. Les mesures sont reproduites à l'aide des réponses calculées avec des erreurs moyennes quadratiques relativement élevées. Cela provient probablement de la qualité moyenne des mesures de chargeabilité. Les

couleurs froides (violet, bleu) représentent les valeurs de faible chargeabilité; les couleurs chaudes (rouge, orange) indiquent les chargeabilités élevées. Les sections présentent une distribution de chargeabilité hétérogène. Cela est probablement causé par la différence de minéralisation des stériles d'un endroit à l'autre. Les zones présentant une forte chargeabilité (plus de 70 ms) pourraient correspondre à des zones partiellement saturées avec une forte dissémination de la minéralisation. Au contraire, les zones avec des chargeabilités moindres pourraient correspondre à des stériles contenant plus d'anorthosite que de minerai. Le profil, LNE-SW, coupant les profils L1NW-SE, L2NW-SE et L4NW-SE respectivement aux points M, N et O montrent des valeurs de chargeabilité légèrement différentes de celles observées sous les autres profils pour les mêmes positions.

Contrairement à la résistivité, la corrélation latérale des profils de chargeabilité est assez faible. De plus, il ne semble pas y avoir de corrélation entre les sections de résistivité et de chargeabilité. Quelques endroits montrent des comportements similaires mais ils sont peu fréquents. Comme exemple de comportement similaire, on trouve la couche inclinée au nord-ouest du profil LNE-SW qui est résistive avec une faible chargeabilité. Cela pourrait être causé par le socle rocheux non minéralisé (faible chargeabilité) avec une faible teneur en eau (plus résistive). Les sections de chargeabilité relatives aux mesures avec la séparation n variant entre de 1 à 16 sont données à l'annexe 7.3 (sur CD).

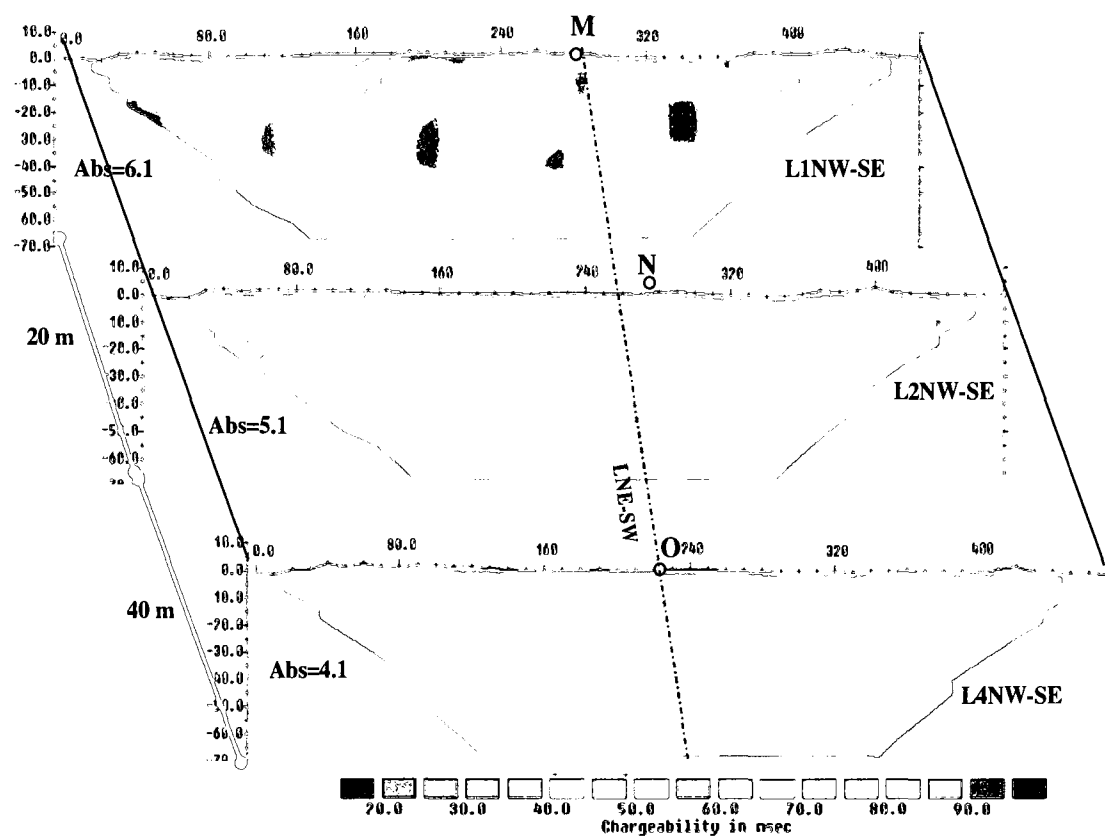


Figure 7.24 : Réponses calculées de chargeabilité, pour les 3 levés parallèles soit L1NE-SW, L2NW-SE et L3NW-SE, avec les erreurs de reproductions (la profondeur d'investigation est d'environ 60 m). Les points M, N et M montrent les positions d'intersection avec le profil LNE-SW.

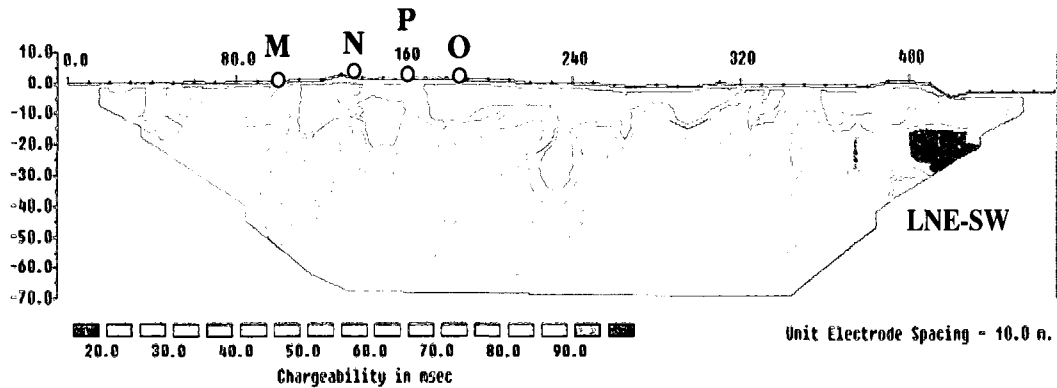


Figure 7.25 : Réponse calculée en chargeabilité du profil LNE-SW. Les points M, N, et O montrent les points d'intersection respectivement avec les levés, L1NE-SW, L2NE-SW et L 4 NE-SW

7.4 Modélisation 2D des données d'investigation en profondeur

Après l'inversion des données PP, nous avons effectué quelques modélisations de la résistivité électrique à l'aide du logiciel Res2Dmod (Loke et al., 1996) en se basant sur les sections obtenues par inversion. Le but de cet exercice consiste à trouver un modèle synthétique de résistivité qui expliquerait bien les mesures. La corrélation de la section obtenue par inversion des mesures avec la réponse inversée de ce modèle synthétique permet d'évaluer la robustesse du modèle issu des mesures. Pour ce faire, on construit tout d'abord un modèle de résistivité basé sur la distribution de résistivité électrique déduite par inversion des mesures. Ensuite, on calcule la réponse directe du modèle puis on inverse la réponse (pseudo-section calculée) du modèle ainsi construit. Enfin, on réajuste ce modèle de résistivité afin d'avoir une section de résistivité la plus proche possible de la section obtenue par mesure. La figure 7.26 montre un exemple de modélisation pour le profil LNE-SW. L'examen de cette figure montre que la distribution de la résistivité estimée (modèle a) sous le profil LNE-SW permet d'avoir une section de résistivité (section c) très proche de celle obtenue par mesure (section d). En négligeant les effets des variations latérales (effets 3D) qu'auraient contribué aux mesures 2D au droit du profil, cela indiquerait que le modèle de résistivité

(modèle a) est un modèle plausible de la distribution de résistivité des stériles sous le levé LNE-SW. La figure 7.27 montre un autre exemple de modélisation pour le cas du profil L4NW-SE.

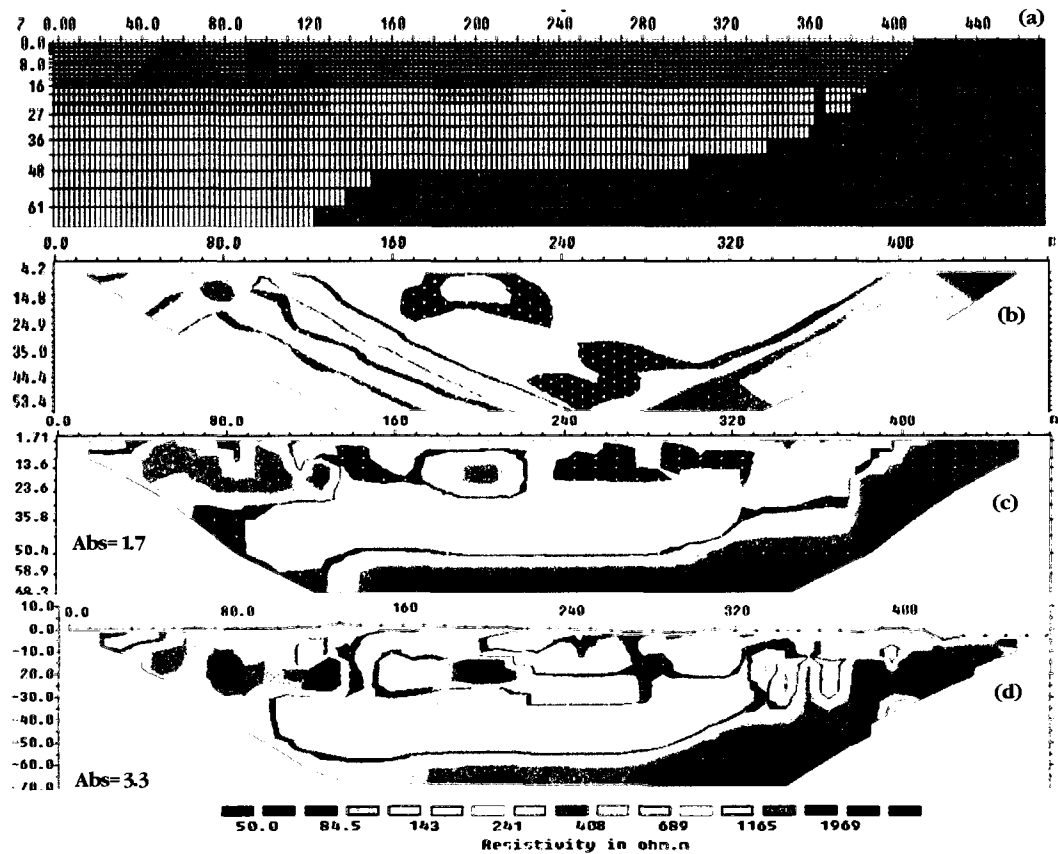


Figure 7.26 : Résultat d'une modélisation pour le profil LNE-SW, (a) modèle de résistivité, (b) pseudo-section calculée, (c) section obtenue par inversion de la pseudo-section calculée, (d) section obtenue par inversion de la pseudo-section mesurée sur le terrain

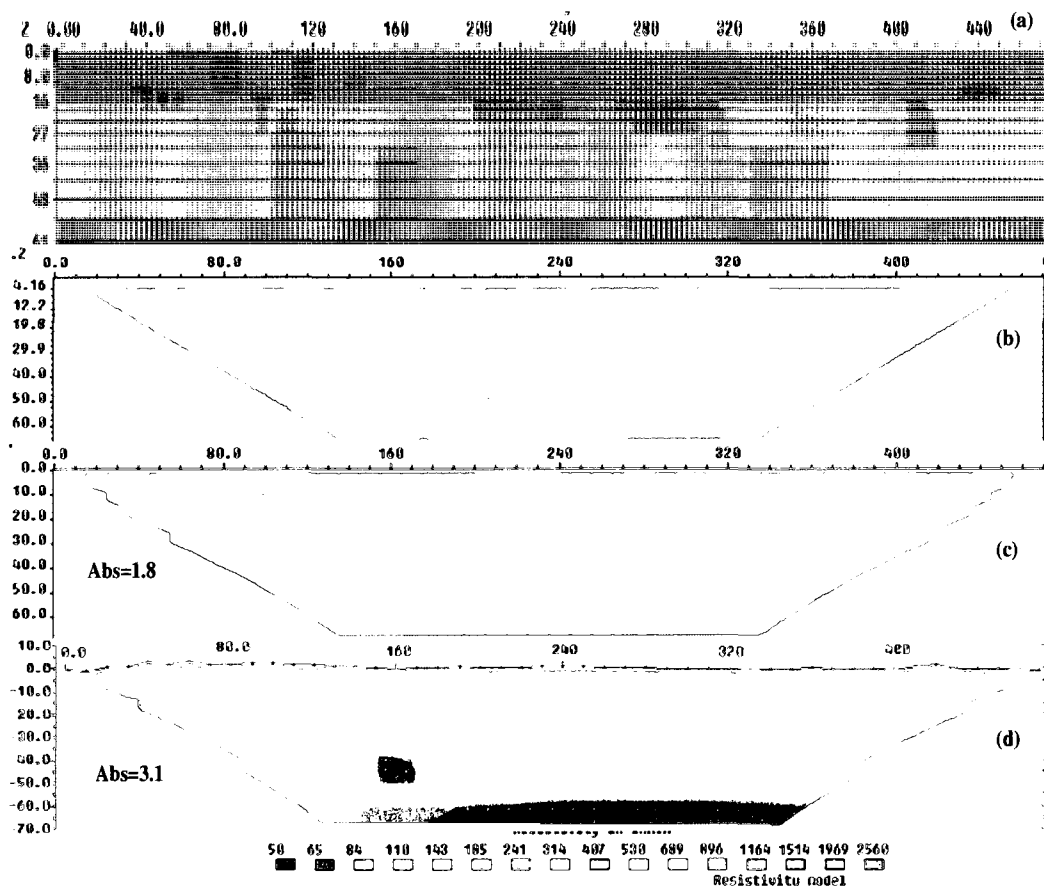


Figure 7.27 : Résultat d'une modélisation pour le profil L4NW-SE, (a) modèle de résistivité, (b) pseudo-section calculée, (c) section obtenue par inversion de la pseudo-section calculée, (d) section obtenue par inversion de la pseudo-section mesurée sur le terrain

7.5 Discussion des résultats

Les mesures électriques pour l'investigation en proche surface ont montré que la couche superficielle, soit les 8 premiers mètres, présente une distribution assez hétérogène. La présence des hétérogénéités en proche surface a rendu l'interprétation compliquée en déformant les interfaces entre les couches. Les zones moins compactées, visibles en surface, ont des résistivités élevées sur les deux premiers mètres (plus de $1000 \Omega.m$). Ces zones se situent à l'écart des endroits de passage de la

machinerie (cf partie est des profils P1W-E et P2W-E et le profil L4). Les mesures effectuées sur la zone II ont montré la présence d'une couche située entre 3 m et 6.5 m de profondeur, légèrement plus conductrice que celles au dessus et en dessous. Cette stratification est probablement produite par les équipements lors de la construction de la halde. La résistivité moyenne dans les zones compactées est de l'ordre de 500 Ω .m. Les mesures effectuées au laboratoire à l'aide du dispositif dipôle-dipôle équatorial pour le passant 10 mm ont montré des valeurs de résistivité similaires pour un degré de saturation de 37%. Les mesures de la teneur en eau massique réalisées sur des échantillons issus des tranchées ont montré des valeurs variant de 1.3 % à 2.4 %. Ces valeurs correspondent à des degrés de saturation variant entre 14 % et 27 % (pour une porosité $n=0.25$). Ces degrés de saturation sont inférieurs à 37% correspondant à la mesure au laboratoire qui a menée à une résistivité de 500 Ω .m. La différence en résistivité (entre les mesures au laboratoire et sur le terrain) pourrait être attribuée au contraste de la granulométrie des stériles étudiés au laboratoire et celle du matériau dans les tranchées. Elle pourrait aussi provenir de la différence de résistivité de l'eau interstitielle qui n'est pas la même au laboratoire et sur le terrain. La résistivité la plus élevée mesurée au laboratoire est de l'ordre de 600 Ω .m pour un degré de saturation de 30 %. Cela indique que les zones de la halde qui présentent des résistivités plus élevées que 600 Ω .m pourraient avoir des degrés de saturation plus faible que 30 %.

Le développement d'une loi décrivant la variation de la résistivité effective en fonction du degré de saturation, pour ce type de matériau à forte concentration en minéral, pourrait permettre de mieux comprendre les mesures de terrain et de les relier aux mesures effectuées au laboratoire. Ce travail peut s'effectuer à l'aide d'une modélisation en considérant les résistivités intrinsèques et les fractions volumiques des particules résistantes et conductrices ainsi que la taille et la forme des particules.

Les mesures de chargeabilité en proche surface ont montré des valeurs importantes variant entre 50 à 120 ms. Ces ordres de grandeur sont validés par les mesures au

laboratoire qui ont montré des valeurs moyennes de chargeabilité d'environ 90 ms. Les mesures au laboratoire ont montré également que la chargeabilité décroît légèrement avec le degré de saturation; elle passe de 92 ms pour un $S_r=36\%$ à 80 ms pour un $S_r=98\%$. Cela indique que les chargeabilités mesurées sur la halde seraient surtout liées à la minéralisation plutôt qu'à la teneur en eau. En effet, il suffit que les stériles soient partiellement saturés en eau avec une concentration importante en minéralisation pour générer des réponses élevées en chargeabilité.

Les mesures de la résistivité électrique en profondeur ont révélé la présence d'une couche hétérogène superficielle d'une épaisseur d'environ 30 m avec une résistivité dominante de 500 $\Omega.m$. Cette couche montre quelques anomalies conductrices ou résistives. Ces hétérogénéités pourraient être attribuées à la variation de la teneur en eau, d'un endroit à l'autre, en fonction de la granulométrie et de la composition minéralogique. Ainsi, les zones présentant des faibles résistivités peuvent être associées à des zones bien compactées de granulométrie plus fine, retenant plus d'eau. Les zones résistives sont probablement associées à des zones de granulométrie grossière qui ne retiennent pas une quantité importante d'eau, ou qui ont une faible minéralisation. Il n'est cependant pas exclu que les deux effets soient présents simultanément à ces endroits.

La deuxième couche plus profonde révélée dans la majorité des levés de résistivité est conductrice (50 à 300 $\Omega.m$) et plus homogène, avec une épaisseur d'environ 20 m. Cependant, elle pourrait contenir des structures résistives que la méthode électrique est incapable de détecter à cause de la diminution de la résolution avec la profondeur et l'effet d'homogénéisation. En effet, lorsque la taille du dispositif de mesure devient plus importante que celle des inclusions, la couche apparaît homogène; plus de détail sur ce phénomène d'homogénéisation est présenté dans Rey et al (2005). La présence de cette couche sur l'ensemble des levés effectués en 2005 et 2008 a été identifiée à l'aide de deux systèmes de mesures et de paramètres d'acquisition différents. La faible

résistivité de cette couche pourrait être expliquée par les conditions de stockage durant cette étape de construction de la halde (la granulométrie, la concentration en minerai, le mode de construction). En considérant les mesures effectuées au laboratoire, ces faibles résistivités correspondraient à des degrés de saturation plus élevés que 60%.

Cette couche conductrice pourrait être aussi le siège de réactions qui donnent naissance à la libération du nickel dans les effluents de la halde. Afin de vérifier cette hypothèse, on recommande de forer dans les zones les plus conductrices et d'analyser les échantillons récupérés à ce niveau de profondeur de la halde. La réalisation de diagraphies géophysiques au niveau des forages nécessiterait que ces derniers soient chemisés avec des tubes (crépines si possible) en PVC (pas avec du métal). Le radar en forage permet d'obtenir le profil de la teneur en eau. La combinaison avec la diagraphie EM permettrait de mieux estimer la teneur en eau, la porosité, la conductivité du fluide et la présence des matériaux métalliques autour du forage. La technique de la diagraphie de susceptibilité magnétique pourrait aussi être intéressante à essayer dans les forages. Elle permet de déterminer les zones de haute concentration en particules magnétiques autour du forage.

La dernière couche détectée, sans être limitée en profondeur, est très résistive (environ 2000 $\Omega.m$). Cette couche correspond probablement à des stériles grossiers datant du début de l'exploitation de la mine. Elle peut contenir également des inclusions conductrices non détectables à cause de la faible résolution avec la profondeur.

La chargeabilité est forte sur l'ensemble des levés effectués sur la halde. Sa distribution n'est pas similaire à celle de la résistivité. Dans le cas de l'investigation de la proche surface, les fortes chargeabilités sont probablement associées à des zones partiellement saturées avec une dissémination importante des grains métalliques d'hémo-ilménite en forte concentration dans les stériles (voir tableau 5.12 et 5.13)

Les autres méthodes géophysiques testées sur la halde Petit Pas ont produit des données jugées peu exploitables (voir annexe 1). Les sondages électromagnétiques transitoires ont montré une inversion de la polarité du champ magnétique secondaire contraire au cas normal lorsqu'ils sont générés par induction. Ce phénomène d'inversion de signe pourrait être expliqué par des effets de dispersion. Cette hypothèse est appuyée par les mesures de la chargeabilité en PP temporelle qui montrent des valeurs très élevées et presque uniformes sur l'ensemble des endroits investigués. Les méthodes transitoires sont insensibles à la présence de couches résistives. Donc, même si les mesures n'étaient pas distordues, elles ne donneraient pas d'information à plus de 50 m de profondeur puisque la couche détectée à plus de 50 m de profondeur est résistive. Cependant, ces mesures pourraient mieux définir le haut de la couche conductrice située à environ 30 m de profondeur.

Les profils radar ont montré qu'il est difficile de distinguer des réflecteurs qui peuvent être associés à des structures dans la halde. Une forte hétérogénéité du matériau qui disperse l'énergie du signal (faible profondeur d'investigation) serait probablement la cause de ce comportement des ondes radar.

Chapitre 8 : Conclusions et recommandations

Les travaux présentés dans ce mémoire avaient pour objectif de cartographier les zones de rétention d'eau et de délimiter les éléments de la structure interne de la halde Petit Pas à l'aide de méthodes géophysiques. Les zones de rétention d'eau sont souvent associées à un matériau plus dense et/ou à une granulométrie plus fine et elles contrôlent les écoulements dans une halde. Pour atteindre ces objectifs, nous avons utilisé des méthodes électriques sensibles à la variation de la teneur en eau et à la nature des solides dissous.

La réalisation de ce travail comporte deux parties. La première partie porte sur les mesures en colonne au laboratoire afin de déterminer les propriétés hydrogéotechniques et électriques des stériles issus de la halde. La deuxième partie a été consacrée aux mesures géophysiques de surface sur une portion de la halde.

Les mesures hydro-géotechniques réalisées au laboratoire sur un échantillon de stériles de la halde ont montré que la granulométrie (tronquée à 50 mm) est très étalée (avec un coefficient d'uniformité $C_u \geq 45$). Les mesures de la conductivité hydraulique à saturation (k_{sat}) effectuées sur des stériles dont la taille des particules est moins de 19 mm de diamètre ont produit des valeurs de l'ordre de 10^{-2} cm/s. Une bonne corrélation de ces mesures peut être établie avec les valeurs de k_{sat} prédites à l'aide du modèle de Kozeny-Karman. Les courbes de rétention d'eau (CRE) mesurées varient en fonction de la granulométrie du matériau considéré. Les valeurs de la pression d'entrée d'air et la succion résiduelle tendent à diminuer en augmentant le pourcentage des grosses particules. Une mesure de la teneur en eau résiduelle effectuée sur des stériles dont le diamètre est inférieur à 4,75 mm a montré une valeur θ_r de l'ordre de 7 %. La corrélation entre les CRE mesurées et prédites à l'aide du modèle MK est plutôt moyenne.

Les mesures au laboratoire des propriétés électriques ont permis de mettre en évidence plusieurs de leurs caractéristiques. Tout d'abord, la chargeabilité mesurée est très élevée, variant entre 50 à 100 ms. Ceci met en évidence la forte concentration de minéralisation disséminée au sein des stériles. Ces résultats sont en accord avec les analyses minéralogiques qui indiquent un pourcentage élevé en oxydes de fer (hém-ilménite, 30% à 70%). La chargeabilité décroît légèrement avec le degré de saturation ; elle passe de 92 ms pour un $S_r = 37\%$ à 78 ms pour un $S_r = 98\%$. Également, la chargeabilité décroît lorsque la conductivité électrolytique du fluide interstitiel augmente. Les deux cas de décroissance pourraient être expliqués par la tendance du courant électrique à passer préférentiellement à travers l'électrolyte plutôt qu'à travers les interfaces grains/électrolyte, ce qui réduit la chargeabilité. Dans ce cas, il serait utile de mesurer la chargeabilité de la fraction grossière (plus de 1 mm par exemple) afin de mieux identifier l'origine de la chargeabilité.

La concentration importante en oxydes de fer influence aussi la résistivité des stériles, spécialement pour de faibles degrés de saturation. La conductivité (inverse de la résistivité) peut être vue comme la somme de deux conductivités en parallèles, soit la conductivité électrolytique et celle des particules métalliques. La conductivité des particules elle-même est la somme de deux conductivités, soit la conduction électronique dans les particules métalliques et celle de la surface de contact entre les particules. La loi d'Archie, qui est la plus utilisée pour décrire le comportement de la résistivité en fonction du degré de saturation, considère que la matrice (squelette) du matériau est résistive et que la conduction se fait essentiellement dans l'électrolyte. Pour nos mesures, cela conduit à une surestimation de la résistivité, surtout pour les faibles degrés de saturation. D'autres lois, développées essentiellement pour la prise en compte de la conductivité de la surface des particules d'argiles, n'ont pas permis de bien décrire le comportement de nos mesures de résistivité. Dans ce cadre, nous recommandons la réalisation de modélisations pour développer une loi permettant de décrire le comportement de ce type de matériau en fonction des caractéristiques des

particules métalliques (taille, forme, surface de contact, concentration, résistivité intrinsèque etc..).

Les mesures électriques effectuées au niveau de la surface de la halde ont été réparties en deux ensembles. Le premier ensemble porte sur une investigation de la proche surface, responsable de l'infiltration de l'eau et du gaz en profondeur de la halde. Le deuxième ensemble consiste à effectuer des mesures avec des grands écartements pour l'investigation de la halde en profondeur.

Les mesures en proche surface (8 premiers mètres de profondeur) ont montré que la résistivité moyenne des stériles est de l'ordre de 500 Ω .m. Quelques levés ont montré des anomalies plus résistives (plus de 1200 Ω .m) sur les deux premiers mètres. Ces anomalies sont associées à des zones moins denses (poreuses et perméables) favorisant plus l'infiltration d'eau en profondeur. Afin de compléter l'information, il serait utile de faire des mesures électriques à petite échelle dans les tranchées où moment de la prise des échantillons. Cela permettrait de mieux calibrer les mesures de résistivité in situ en termes de teneur en eau. Les sections de résistivité montrent parfois des stratifications qui peuvent être associées à des niveaux où les machines ont circulé plus souvent. Cependant, l'absence de stratifications inclinées et de l'alternance de couches résistives et conductrices laisse supposer que la méthode utilisée pour la construction de la halde dans la section investiguée est celle de déversement à la benne avec régilage. Cette méthode consiste à déposer les stériles sous forme de tas sur la surface de la halde pour ensuite être étendues et compactés. Dans ce cas, la ségrégation est faible mais le degré de compaction est élevé.

Les mesures de chargeabilité montrent des valeurs assez élevées, de l'ordre de celles mesurées au laboratoire. La chargeabilité et la résistivité présentent parfois quelques comportements similaires où des résistivités élevées sont associées à des chargeabilités relativement moindres. Ces zones ont probablement un faible degré de saturation, insuffisant pour générer des réponses élevées en chargeabilité.

Globalement, la résistivité renseigne plus sur la teneur en eau et la nature des solides, alors que la chargeabilité indique les zones où la concentration et la dissémination de la minéralisation sont importantes.

L'investigation en profondeur réalisée en 2005 (Abitibi Géophysique) et 2008 (EPM), à l'aide d'appareils de mesure et de paramètres d'acquisition différents, montrent sensiblement la même distribution de la résistivité. Cette répétitivité témoigne d'une certaine robustesse des structures mise en évidence dans les levés de résistivité. Ainsi, les sections ont montré une première couche résistive (environ 900 $\Omega.m$) assez hétérogène d'une épaisseur d'environ 30 m. Dans cette couche, nous distinguons quelques anomalies résistives et conductrices. La 2^{ème} couche distinguée dans les sections est assez conductrice (80 à 250 $\Omega.m$) avec une épaisseur d'environ 20 m. Deux hypothèses liées aux conditions de stockage pourraient expliquer cette chute de résistivité. La première hypothèse concerne la granulométrie qui pourrait être plus fine en profondeur (retenant plus d'eau). La deuxième hypothèse concerne la concentration en hémioilménite qui pourrait être plus élevée donnant naissance à un fluide interstitiel résiduel plus conducteur (il peut s'agir aussi des deux hypothèses ensemble). Afin de vérifier ces hypothèses, nous recommandons la réalisation de forages dans les zones les plus conductrices et les plus résistives pour comparer les propriétés électriques des deux types de matériaux. Des diagraphies géophysiques pourraient être effectuées le long des forages si les conditions sont favorables (avec un tubage en PVC). Cela permettrait de réaliser une corrélation avec les mesures effectuées en surface en plus de fournir des informations locales.

La troisième structure détectée par les levés, vers 50 m de profondeur, est résistive. Les deux dernières couches détectées apparaissent plus homogènes, au point de vue mesures électriques, mais elles peuvent inclure des inclusions résistives ou conductrices que la méthode électrique est incapable de les détecter avec une bonne résolution à cause des conditions d'homogénéisation.

Les autres méthodes géophysiques testées sur la halde Petit Pas ont menées à des données jugées peu exploitables. Les sondages électromagnétiques transitoires ont montré des valeurs négatives du champ magnétique secondaire sur l'ensemble des sondages effectués. Cela est contraire au cas usuel où le champ magnétique secondaire est généré par les courants de conduction. Ce phénomène d'inversion de polarité pourrait être expliqué par des effets de polarisation provoquée. Cette hypothèse est plausible en considérant les mesures de la chargeabilité temporelle en basses fréquences qui montrent des valeurs très élevées et presque uniformes, sur l'ensemble des endroits investigués. Les profils radar ont montré qu'il est difficile de distinguer des réflecteurs qui peuvent être associés à des structures dans la halde. Une forte atténuation du signal (faible profondeur d'investigation) avec des diffractions sur des blocs de stériles ayant la taille de la longueur d'onde utilisée serait probablement la cause de ce comportement du signal radar.

L'étude réalisée ici a donc permis d'identifier les méthodes les plus appropriées pour caractériser une halde de grande dimension et contenant des roches stériles minéralisées avec des propriétés électriques complexes. Ce travail a également permis de mieux définir les propriétés physiques des matériaux et d'identifier certaines des principales caractéristiques de la structure interne de la halde.

Bibliographie

ABEM Instrument AB, 2007. *Terrameter SAS 4000 et Lund Imaging System*. Manuel en ligne, http://www.abem.se/files/upload/Manual_Terrameter.pdf.

Abitibi Géophysique., 2005. *Caractérisation géophysique de la halde Petit-Pas*. Rapport technique interne, # 05N853, 2005. Abitibi Géophysique Inc, 395 Avenue Centrale, Val-D'or, QC, Canada J9P 1P4.

American Society for testing and materials (ASTM)., 1984. *Standard test method for specific gravity and absorption of fine aggregate*. Annual Book of ASTM Standards : USA 4:02 6p. C 128-84.

American Society for Testing and Materials (ASTM)., 2002a. ASTM D422-63. *Standard test method for particle-size analysis of soils*. American society for testing and materials, West Conshohocken, PA.

Annan, A. P., 2001. *Ground penetrating radar*. Workshop Notes, Sensors and Software Inc., Canada.

Anterrieu, O., 2006. *Caractérisation géophysique de la structure interne d'une halde à stériles*. Mémoire de maîtrise en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Canada.

Archie, G.E., 1942. *The electrical resistivity log as an aid to determining some reservoir characteristics*. Trans. A.I.M.E., 146: 389-409.

Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., 2002a. *Environnement et gestion des rejets miniers*. [CD-ROM]. Montréal : Presses internationales Polytechnique.

Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., Chapuis, R.P., 2003. *Development of a model to predict the water retention curve using basic geotechnical properties*: École Polytechnique de Montréal 51p. EPM-RT-2003-01.

Bobatchev, AA., Robain, H., 2004. *Manuel d'utilisation du logiciel X2IPI*. Université de Moscow, Russie et l'Institut de Recherche et Développement, France.

Bourrel, S., 2008. Rapport de stage, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal, Canada.

Bowles, J.E., 1984. *Physical and Geotechnical Properties of Soils*. McGraw-Hill.

Buselli, G., 1982. *The effect of near-surface superparamagnetic material on electromagnetic measurements*. Geophysics 47 (9), 1315–1324.

Bussière, B., Benzaazoua, M., Plante, B., Pepin, G., Aubertin, M., et Laflamme, D. (2008). *Évaluation du comportement géochimique des stériles miniers de la mine Lac Tio, Havre-St- Pierre, Québec*. Symposium 2008 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, Québec.

Bussière, B., Dagenais, A.-M., Villeneuve, M. et Plante, B., 2005. Rapport final : *Caractérisation environnementale d'un échantillon de stériles du Lac Tio*. URSTM, octobre 2005. Présenté à Mme Dominique Beaudry, Conseillère principale – Environnement, QIT-Fer et Titane inc.

Chapillier, D., 2000. *Prospection électrique de surface*. (Cours online de géophysique, Université de Lausanne, Institut Français du pétrole, Suisse, France).

Chapuis, R.P., Aubertin, M., 2003. *On the use of Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils*. Canadian Geotechnical Journal, 40 (3):616-628.

Chouteau, M., 2005 : *Caractérisations géophysiques de la halde à stériles (nord) de la Mine Tio (phase I); Étude pour une proposition de travaux géophysiques*; Laboratoire de géophysique appliquée, École Polytechnique de Montréal, 21 février 2005, 15 pages.

Chouteau, M., 2007. Notes de cours : *Techniques géophysiques de haute résolution* (cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal, Canada).

Chouteau, M., Giroux, B., 2006. Notes de cours : *Méthodes électriques (cours de géophysique appliquée II, École Polytechnique de Montréal, Canada).*

Chouteau, M., Tournier, B., 2005. *Analyse de mesures électriques et électromagnétiques, Halde Petit Pas, Mine Tio (LGAP 2005-04)*. Rapport interne du laboratoire de géophysique de l'École Polytechnique de Montréal, Canada.

Comsol Multiphysics, 2005. Version 3.2. <http://www.comsol.com/>.

Descloîtres, M., 1998. *Les sondages électromagnétiques en domaine temporel (TDEM) : application à la prospection d'aquifères sur les volcans de Fogo (Cap Vert) et du Piton de la Fournaise (La Réunion)*. Thèse de doctorat en Géophysique, Université Paris 6, France.

Domenico, P.A., Schwartz, F.W., 1998. *Physical and Chemical Hydrogeology*. 2nd edition. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc. 506 p. pp.216-226 et 372-382.

El-Kaliouby, H.M., El-Diwany, E.A., Hussain, S.A., Hashish, E.A., Bayoumi, A.R., 1997. *Optimum negative response of a coincident-loop electromagnetic system above a polarizable half-space*. Geophysics 62 (1), 75–79.

Eriksson, N., Gupta, A., Destouni, G., 1997. *Comparative analysis of laboratory and field tracer tests for investigating preferential flow and transport in mining waste*

rock: department of Civil and Engineering, Royal Institute of Technology, S-100 44 Stockholm, Sweden, Journal of hydrology 194 (1997) 143-163, 20p.

Fala, O., 2002. *Étude des écoulements non saturés dans les haldes à stériles à l'aide de simulations numériques*. Mémoire de maîtrise en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Canada.

Fetter, C.W., 2000. Applied Hydrogeology 4e edition. Prentice Hall, chap.10 pp.402-406.

Fishman, M. J., Friedman, L. C., 1989. *Methods for Determination of Inorganic Substances in Water and Fluvial Sediments*. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 5, Chapter A1, USGS, Alexandria, VA.

Fitterman, D.V., Stewart, M.T., 1986. *Transient electromagnetic sounding for groundwater*. Geophysics, v. 51, pp. 995-1005.

Flis, M.F., Newman, G.A., Hohmann, G.W., 1989. *Induced-polarization effects in time-domain electromagnetic measurements*. Geophysics 54 (4), 514–523.

Freeze, R.A., and Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*, Prentice-Hall, Englewoods Cliffs, N.J.

Gaillot, A., 2007. *Caractérisation des propriétés hydrogéologiques de rejets miniers*. Rapport de stage, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal, Canada.

Gamache-Rochette, A., 2004. *Une étude de caractérisation en laboratoire et sur le terrain des écoulements de l'eau dans les roches stériles*. Mémoire de maîtrise en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Canada.

Geotomo Software., 2001. RES2DMOD Ver.3.0, 2D resistivity and IP forward medelling software, Malaysia (www.geoelectrical.com).

Geotomo Software., 2002a. RES2DINV, Ver.3.55, 2D resistivity and IP inversion software, Malaysia (www.geoelectrical.com).

Geotomo Software., 2002a. RES3DINV, Ver.2.15, 3D resistivity and IP inversion software, Malaysia (www.geoelectrical.com).

Günther, T., 2007. Logiciel d'inversion des données de tomographie électrique 3D, DC3DInvRes, <http://dc3dinvres.resistivity.net>.

Halleux L., 1995. *Prospection géophysique en eau douce : voies hydrauliques, lacs, zones marécageuses*. Thèse de Doctorat, Université de Liège, Belgique, 241 p.

Hallof, P.G. and Pelton, W.H., 1980. *The removal of inductive coupling effects from spectral IP data*. Presented at the SEG 50th Annual International Meeting, Houston, Texas, 16-20 November 1980 (Phoenix Geophysics Ltd, Ontario).

Hernandez, M.A., 2007. *Une étude expérimentale des propriétés hydriques des roches stériles et autres matériaux à granulométrie étalée*. Mémoire de maîtrise en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Canada.

Hillel , D., 1980. *Fundamentals of soil physics*. Academic Press, New York.

Hillel, D., 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press, San Diego, California.

Huntley, D., 1986. *Relation between permeability and electrical resistivity in granular aquifers*. Ground Water, 1986, Vol.24, No.4, 466-474.

Intissar, R., 2007. *Traitement et interprétation des sondages MT et TDEM réalisés sur le bassin Sénégalais*, projet du cours GML 6204.

IRIS Instruments, 2005. *Syscal Pro Standard et Switch Pro (48-72 or 96) Version, 10 Channels Resistivity-meter for Resistivity and IP measurements*. Manuel en ligne. <http://www.Heritagegeophysics.com/images/promanual.pdf>.

Keller, G.V., 1988. *Rock and mineral properties*. In: Nabighian, M.N. (Ed), *Electromagnetic methods in applied geophysics, 1*. SEG publ., pp.13-51 Theory, chap.2.

Keller, G.V. and Frischknecht, F.C., 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press.

Lasfargues, P., 1957. *Prospection Électriques Par Courants Continus*. Manuel de prospection géophysique publiés sous la direction de Jean Goguel, Masson& Cie, Éditeurs.

Lesmes, D., Friedman, S., 2005. *Relationships between the electrical and hydrogeological properties of rocks and soils*; in Hydrogeophysics, Edited by Yoram Rubin and Susan Hubbard; Springer, Netherlands, 87-128

Loke, M.H., 2002. *RES2DINV ver. 3.5, Rapid 2-D Resistivity and IP inversion using the least-squares method*. User manual.

Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. *Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-Newton method*. Geophysical Prospecting, 44, 2, 131-152.

Marescot, L., 2007. *Géophysique appliquée à l'archéologie*. Note de cours, Université de Fribourg, Suisse.

Mbonimba, M., Aubertin, M., Bussière, B., 2006. *Predicting the unsaturated hydraulic conductivity of granular soils from basic geotechnical properties using the modified Kovács (MK) model and statistical models*. Canadian Geotechnical Journal, 43: 773-787.

Mbonimba, M., Aubertin, M., Chapuis, R.P., Bussière, B., 2002. *Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity*. Geotechnical and Geological Engineering, 20: 235-259.

Mbonimba, M., Bédard, C., Aubertin, M., Bussière, B., 2004. *A model to predict the unsaturated hydraulic conductivity from basic soil properties*. 57th Canadian Geotechnical conference, 5th joint CGS/IAH-CNC Conference. Quebec Session 3A, p. 16-23.

McCarthy, D.F., 2002. *Essentials of Soil Mechanics and Foundations: Basic Geotechnics* (6th ed.). N.J: Pearson Education Inc, Prentice Hall.

McNeill, J.D., 1990. *Use of electromagnetic methods for groundwater studies*. In : Ward, S.H. (ed), Geotechnical and Environmental Geophysics. Vol. 1: Review and Tutorial. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 191-218.

Nabighian N. et Elliot C.L., 1976, *Negative induced polarization effects from layered media*, Geophysics, 1236-1 255.

Nabighian, M. N., 1979. *Quasi-static transient response of a conducting half-space- An approximate representation*. Geophysics, 44, 1700-1705, 1979.

NICHOLSON, R.V., 2004. *Overview of neutral pH drainage and its mitigation: results of a MEND study*. Proceedings of the MEND Ontario workshop, Sudbury, 2003.

Notes de cours : *Environnement et gestion des rejets miniers (cours MIN 3313, École Polytechnique de Montréal, Canada)*.

Ogata, A., and Banks, R.B., 1961. *A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media*: U.S. Geological Survey Professional Paper 411-A.

Oldenburg D.W., Li Y., 1994. *Inversion of induced polarization data*. Geophysics, Vol. 59, n°9, 1327-1341.

Parkhomenko, E., 1967. *Electrical properties of rock*. G.V. keller, ed., Plenum Press, New York, 1967.

Pepin, G., 2009. *Évaluation du comportement géochimique de stériles générateurs de drainage neutre contaminé à l'aide de cellules expérimentales in situ*. Mémoire de maîtrise en Génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Canada (à paraître).

Plante, B., Benzaazoua, M., Bussière, B., Pepin, G., Laflamme, D., 2008. *Geochemical behaviour of nickel contained in Tio mine waste rocks*. 10 th International Mine Water Association Congress Mine Water and the Environment, Karlovy Vary, Republic Czech, pp.317-320.

Poisson, J., 2004. *Caractérisation géophysique d'une halde à stériles (Halde N°1, Mine Laronde)*. Rapport interne du laboratoire de géophysique de l'École Polytechnique de Montréal, Canada.

Prosyp II, version 2.29, produit d'IRIS INSTRUMENTS, <http://www.iris-instruments.Com> (page consultée le 2 juin 2008).

Protem 47D Operating manual, Geonics Limited.

<http://www.geonics.com/html/protem>

Razafindratsima, S., Cosenza, P., Hovhannissian, G., Camerlynck, C., Tabbagh, A., 2003. *Influence de la teneur en eau sur les propriétés électriques complexes des matériaux argileux : un état des connaissances*. In : Géophysique des sols et des formations superficielles : Geofcan : actes du 4ème colloque. Paris (FRA) ; Paris : Université Pierre et Marie Curie ; IRD, p. 153-156. Colloque Geofcan, 4., Paris (FRA).

Rey, E., 2005. *Caractérisation de sols hétérogènes par des méthodes géophysiques*. Thèse de doctorat en Géophysique appliquée – Géotechnique, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, France.

Reynolds, J.M., 1997. *An Introduction to applied and environmental geophysics*. Edited by John Wiley and Sons Ltd, England.

Richards, L.A., 1931. *Capillary conduction of liquids in porous mediums*. Physics, 1:318-333.

Robain, H., Bobatchev, A., 2004. Manuel du logiciel X2IPI : Tool box for 2D DC measurements with SYSCAL equipment. <http://geophys.geol.msu.ru/x2ipi/x2ipi.html>

Ritz, M., Robin, H., Pervago, E., Albouy Y., Camerlynck, Cristian., Descloitres, M., Mariko, A., 1999. *Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon*. Geophysical Prospecting 47: 85-101.

Sandmeier, K.J., 2002. *ReflexW : Processing software for propagative geophysical methods*. © Sandmeier Scientific Software, Kralsruhe, Allemagne. Link : <http://www.sandmeier-geo.de/>

Sasaki, Y. 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. Geophysical Prospecting, 40, 453-464.

Schön, J.H., 1996, *The Physical Properties of Rocks : Fundamentals and Principles of Petrophysics*, Elsevier.

Telford, W. M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. and AND Keys, D. A., 1990. *Applied Geophysics*, 2nd edn. Cambridge: Cambridge University Press.

Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. *Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines*. Water Resour. Res., v.16, p. 574-582.

Urish, D., 1981. *Electrical resistivity-hydraulic conductivity relationship in glacial outwash aquifers*. Water Resources Research, 1981, Vol.5 No 17, pp. 1401-1408.

van Genuchten, M., 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, 44: 892-898.

Verbeke, J., 2007. *Caractérisation géophysique des couvertures à effets de barrière capillaire*. Rapport de stage, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal, Canada.

ANNEXES

Annexe 1 : Analyse des autres mesures géophysiques effectuées sur la halde

Dans cette annexe, nous présentons l'analyse des autres mesures géophysiques (autres que les méthodes électriques) effectuées sur la halde. Il s'agit des mesures électromagnétiques transitoires ainsi que les mesures géoradar.

9.1 Méthodes électromagnétiques transitoires

Les mesures électromagnétiques transitoires sont plus sensibles à la présence des couches conductrices que les méthodes électriques conventionnelles. Elles permettent également d'atteindre des profondeurs d'investigation importantes avec un dispositif de dimension plus petit que dans le cas de la tomographie électrique. Afin de tester cette méthode pour la caractérisation des stériles de la halde Petit Pas, nous avons effectué 11 sondages TDEM le long des profils électriques (aussi pour des fins de corrélation). La figure 6.15 montre l'emplacement des sondages le long de deux levés PP de la zone d'étude I ; soit le levé P3W-E et P4W-E (voir la localisation des profils au chapitre 6 sur la figure 6.4 et 6.5).

Les figures 6.16, 6.17, 6.18, montrent les résultats des sondages bruts après la vérification de la polarité du champ magnétique primaire. D'autres mesures réalisées par M Chouteau en 2007 (du 03/07/07 au 04/07/07) sont montrées sur les figures 6.19 et 6.20. Ces mesures avaient comme objectif de tester la validité des méthodes transitoires sur la halde. Les mesures ont été effectuées avec les 3 fréquences d'enregistrement soit 285, 75 et 30 Hz. La station 1 a été localisée près du forage H1 (figure 7.16), et a fait l'objet d'une mesure avec la configuration centrale et celle d'un déport de 16 m. Les stations 2 et 3 ont été réalisées sur la halde Puyjalon. Le mode central est celui d'un déport latéral de 19.5 m ont été utilisés pour ces deux stations. La station 3 a été réalisée sur un endroit souillé à l'huile. Le bruit a été également enregistré aux deux stations 1 et 2 pour les fréquences 75 Hz et 30 Hz.

Les sondages St1 à St9 ont été réalisés avec une configuration en déport latérale de 8.5 m. De ce fait, le champ magnétique primaire (CHP) mesuré au niveau du récepteur était négatif. Après la coupure du CHP, le champ magnétique secondaire induit (CHS) est du même sens que le CHP, soit positif à l'intérieur de la boucle d'émission et négatif à l'extérieur. Comme, la configuration adoptée est celle en déport latérale, cela explique la valeur négative (1^{er} point) du CHS mesurée à 10^{-2} ms pour la majorité des sondages (exemple St1, St2, St9). Après ce temps correspondant à la première mesure, les courants de conduction diffusent et passent sous la boucle réceptrice; le champ secondaire devient positif au niveau de la boucle réceptrice. Ceci explique l'apparition des valeurs positives entre $1.2 \cdot 10^{-2}$ ms et $3 \cdot 10^{-2}$ ms (ex : sondage St2). Après cette période, le champ secondaire mesuré devient de nouveau négatif sur l'ensemble des sondages effectués. Cela est contraire à l'état normal de la polarité du champ secondaire généré par des courants de conduction. Ce phénomène d'inversion de signe pourrait être causé par des effets de polarisation provoquée (PP) qui induit des courants de polarisation dans un sens contraire aux courants de conduction. Les mesures effectuées en 2007 montrent également ce comportement. Le niveau du bruit mesuré, à une fréquence de 75 Hz, est inférieur à 10^2 nV/A. Cela signifie que les valeurs du champ magnétique secondaire situées au dessus du niveau de bruit sont des réponses à des structures dans la halde plutôt qu'un bruit EM ambiant (bruit géologique et instrumentale). La distorsion des sondages transitoires par l'effet de dispersion (effet PP) rend l'exploitation des mesures très difficiles et incertaines. Dans la suite nous expliquons à l'aide des simulations ce phénomène de dispersion (PP) ainsi que l'effet de la viscosité magnétique.

▪ **Effet de polarisation provoquée sur les sondages transitoires**

La figure 9.1 explique comment se génèrent les courants de polarisation lors d'une mesure transitoire pour un sol contenant une concentration de grains métalliques et des particules d'argile.

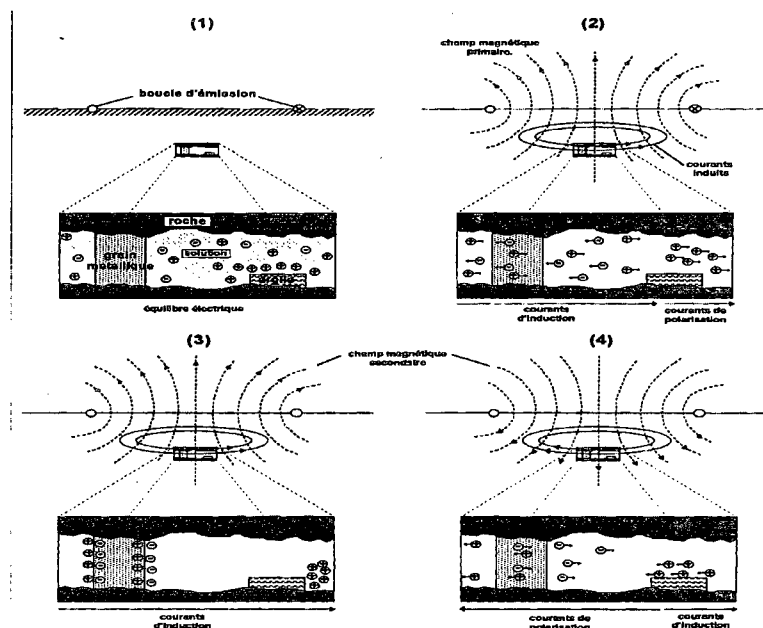


Figure 9.1 : Mouvement des charges dans un sol polarisable sous l'action d'un champ magnétique (tiré de Flis et al, 1989)

Les étapes 1 à 4 de la figure 9.1 expliquent l'évolution du processus physique pour le cas d'un sol polarisable lors d'une mesure transitoire. Au moment de l'injection du courant, les ions sont en équilibre (stade 1, figure 9.1). Ensuite, pendant la coupure du CHP ("turn-off-time") et immédiatement après, les ions responsables de l'effet PP contribuent à l'établissement des courants de conduction (stade 2) (Descloîtres, 1998). Quelques moments plus tard, ces ions acquièrent un état de charge optimal induisant un courant de polarisation nul (stade 3). Finalement, les charges regagnent leurs positions initiales en engendrant un courant de polarisation de sens inverse à celui induit par le champ magnétique primaire (stade 4).

D'après cette analyse, il paraît que le champ magnétique secondaire mesuré au niveau du récepteur est la somme de deux champs secondaires de sens opposé ; un champ magnétique secondaire dû aux courants de conduction et un autre champ dû aux courants de polarisation. Cela explique que la présence des courants de polarisation peuvent réduire l'amplitude du champ secondaire total sans l'inversion de signe. La

difficulté de séparer la contribution de chacun des types de courants complique l'interprétation des courbes de sondages réalisées sur un terrain polarisable tel que la halde Petit Pas. Pour interpréter nos mesures, nous avons réalisés quelques modélisations en considérant le modèle de résistivité de la halde déduit à l'aide de la méthode électrique. Le programme utilisé est «DTCHZ1D4» conçu par le professeur Tabbagh de l'université de Paris VI (Descloitres, 1998). Ce logiciel permet de prendre en considération les effets de polarisation provoquée et de la viscosité magnétique. Tout d'abord, nous considérons seulement l'effet PP et nous supposons des valeurs nulles pour les susceptibilités en phase et en quadrature de phase afin d'évaluer chacun des effets séparément. Le tableau 9.1 présente les caractéristiques de base des 3 couches du modèle utilisé pour les simulations transitoires (plus de détail concernant les paramètres Cole-Cole est donné au chapitre 2). Les résistivités (basses fréquences) de ces couches sont déterminées à partir des mesures de la tomographie électrique. Les paramètres des simulations sont les mêmes que ceux utilisés lors de l'acquisition des sondages St1 à St9. Ainsi, une boucle d'émission de rayon équivalent à 2,82 m avec une configuration offset de 8.5 m et deux fréquences d'enregistrement (285 Hz et 75 Hz) sont utilisées pour les simulations qui suivent.

Tableau 9.1 : Paramètres du modèle de couches utilisé lors des simulations transitoires

paramètres Cole-Cole des couches	couche 1	couche 2	couche 3
résistivité, ρ en ($\Omega.m$)	500	150	2000
chargeabilité, m (ms)	0	0	0
dépendance en fréquence, c	0.25	0.25	0.25
constante de temps, τ (ms)	1	1	1
susceptibilité en phase à 1kHz	0	0	0
susceptibilité en quadrature	0	0	0
permittivité à 1kHz	5	6	2
épaisseur (m)	30	20	-

La figure 9.2 montre le résultat d'une modélisation en considérant une valeur de chargeabilité, m , nulle pour les trois couches du modèle. Les fréquences utilisées sont 285 Hz et 75 Hz. On constate que l'utilisation d'une configuration avec déport de 8.5, en absence de couches chargeables, permet d'avoir des valeurs positives cohérentes (dus purement à la conduction). Le résultat de cette modélisation sert d'un modèle de référence pour les simulations qui suivent.

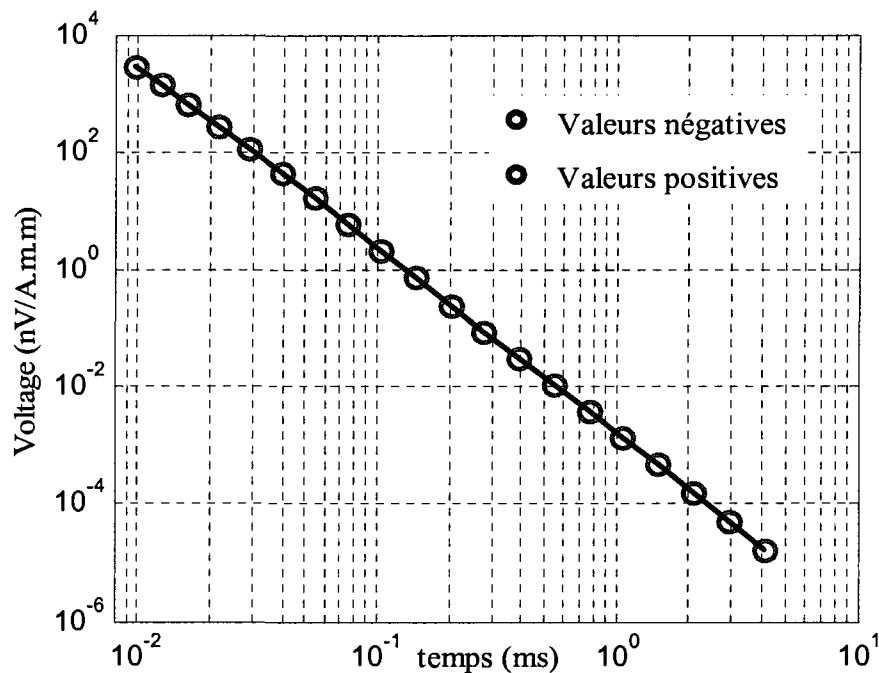


Figure 9.2 : Modélisation de la réponse transitoire du modèle de couche décrit au tableau 9.1, en absence de l'effet de chargeabilité, pour une configuration à déport latéral de 8.5 m.

La figure 9.3 montre des réponses transitoires calculées pour 4 cas différents, en affectant chaque fois une chargeabilité faible ($m=0.1$) à l'une des 3 couches. Le 4^{ème} cas correspond à un modèle où les 3 couches ont une chargeabilité de 0.1. L'analyse de ces réponses (figure 9.3) montre que l'effet PP apparaît à la fin des réponses à des temps plus avancés lorsque la profondeur de la couche polarisable devient plus faible. On constate également que l'effet est ressenti, pour la taille de la boucle utilisée, même pour la 2^{ème} couche chargeable située à 30 m de profondeur. Le cas où les 3 couches sont chargeables montre une réponse avec une amplitude de la partie négative (partie affectée par l'effet PP) légèrement supérieure au cas où seulement la première couche est chargeable

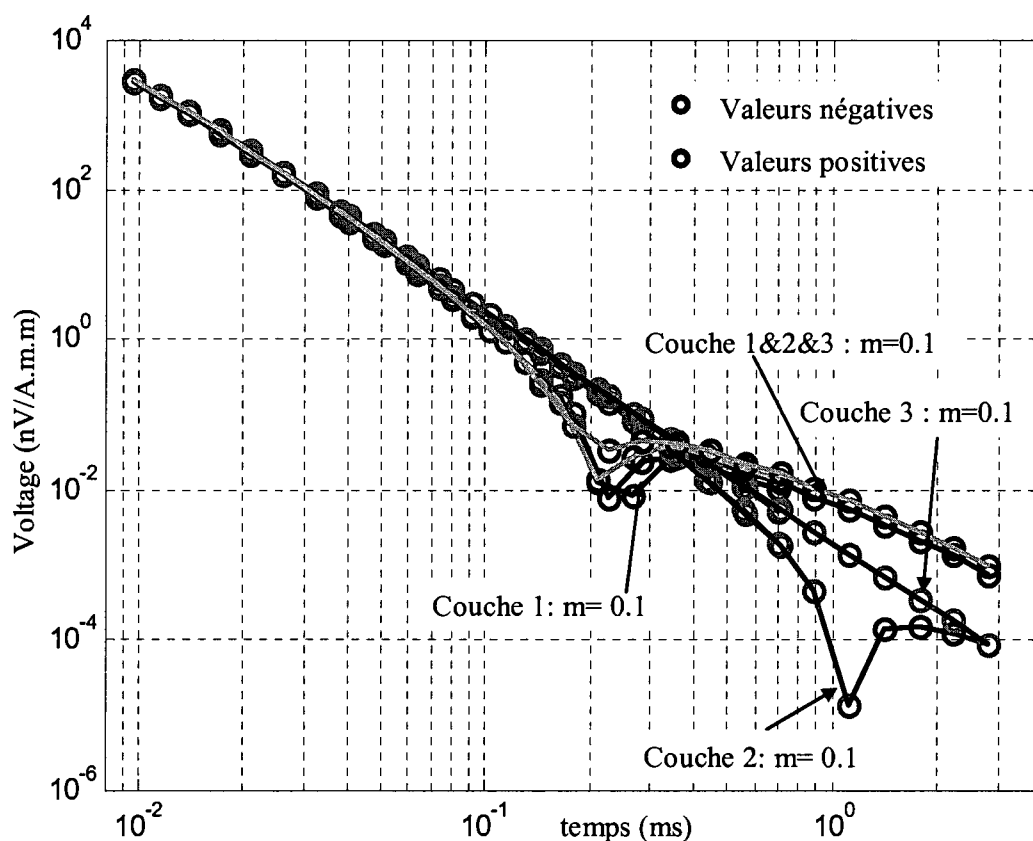


Figure 9.3 : Modélisation de la réponse transitoire du modèle de couche décrit au tableau 9.1 mais en considérant des chargeabilités modérées ($m=0.1$) pour chacune des 3 couches à la fois puis ensemble. La configuration considérée est celle d'un déport latéral de 8.5 m.

La figure 9.4 montre l'effet des couches avec des fortes chargeabilités. Comme dans le cas précédent, on évalue l'effet PP sur la réponse globale en associant une chargeabilité m de 0.9 pour chacune des couches. Le 4^{ème} cas correspond à un modèle où les 3 couches ont une chargeabilité m de 0.9. Dans ce cas, l'effet est très marqué lorsque la couche superficielle est chargeable et s'atténue avec la profondeur. La réponse est distordue dans ce cas bien que la couche chargeable soit située à plus de 50 m de profondeur. La considération d'une distribution de chargeabilité m de 0.9

pour les 3 couches montre une réponse proche du 1^{er} cas où seulement la 1^{ère} couche est chargeable.

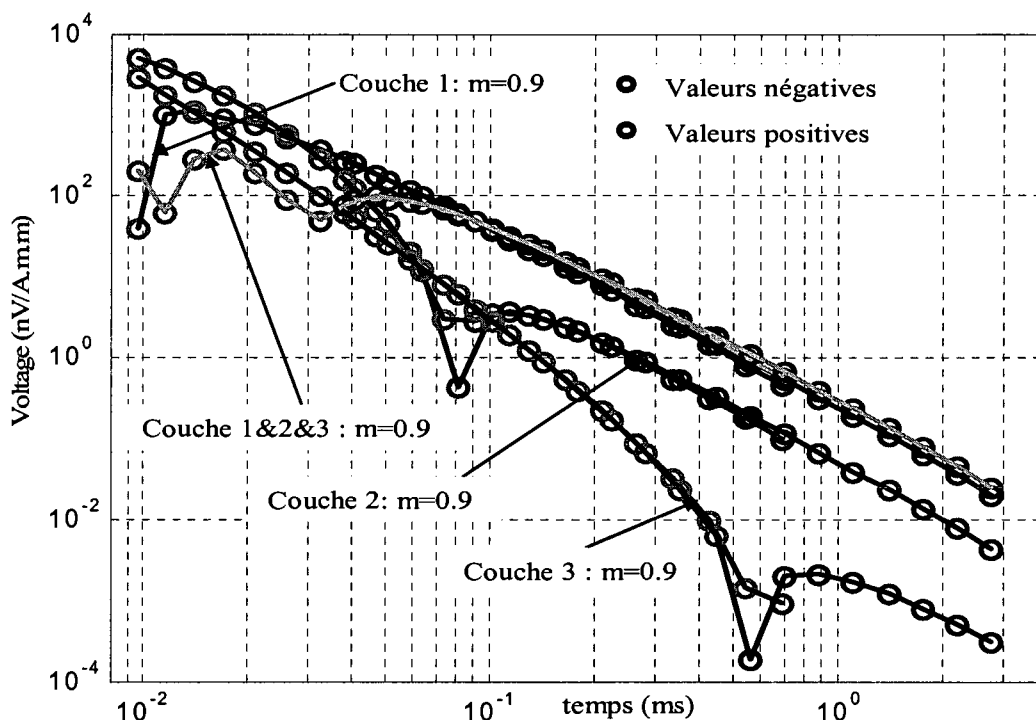


Figure 9.4 : Modélisation de la réponse transitoire du modèle de couche décrit au tableau 9.1 mais en considérant des fortes chargeabilités ($m=0.9$) pour chacune des 3 couches à la fois et ensemble. La configuration considérée est celle d'un déport latéral de 8.5 m.

✓ Comparaison des mesures avec les données de modélisation

Les mesures de la chargeabilité en PP temporelle (basses fréquences) réalisées sur la halde ont montré que la chargeabilité est élevée et presque uniforme sur l'ensemble des endroits investigués en 2005 et 2008. De ce fait, les mesures transitoires observées (par exemple aux St1 et St9 sont comparées avec la réponse calculée pour un modèle où les 3 couches ont une chargeabilité m de 0.9 (figure 9.5 et 9.6).

L'analyse des figures 9.5 et 9.6 montre que les réponses mesurées et calculées présentent un grand écart pour les temps inférieurs à $6 \cdot 10^{-2}$ ms (cet écart diminue avec le temps). Après cette période, les données mesurées et calculées s'ajustent bien sur la partie négative. Cela confirme la forte influence de l'effet PP sur les mesures transitoires réalisées au niveau de la halde. L'ajustement de la première partie est délicat à cause des nombreux paramètres inconnus pour chaque couche. Des résistivités élevées, plus de $1500 \Omega \cdot m$, pour la première couche minimisent l'écart entre la réponse calculée et mesurée sur la 1^{ère} partie (moins de $5 \cdot 10^{-2}$ ms.) mais décalent la courbe calculée au niveau de la partie négative (plus de $5 \cdot 10^{-2}$ ms).

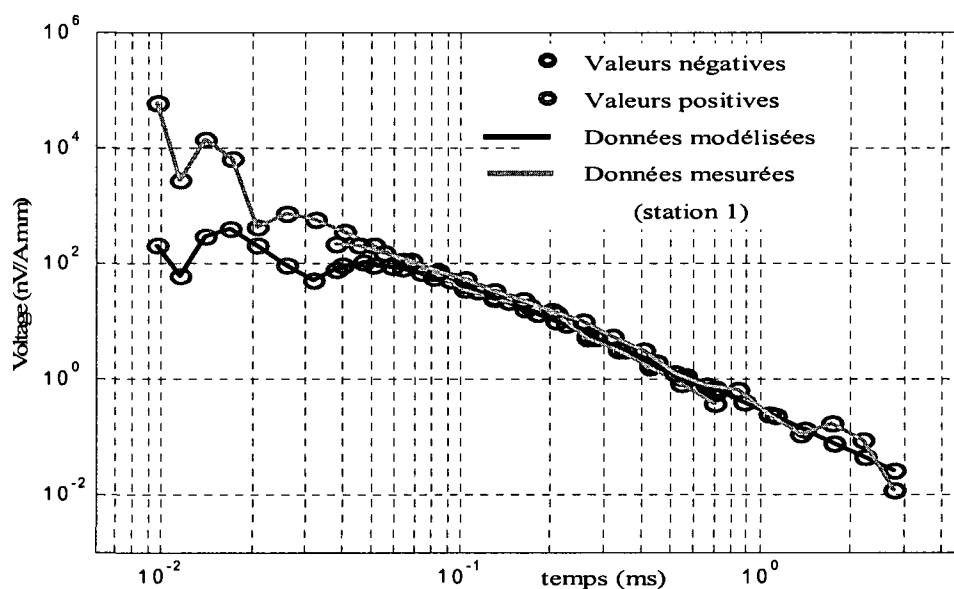


Figure 9.5 : Comparaison des courbes transitoires mesurée (St1) et calculée pour le modèle décrit au tableau avec une chargeabilité m de 0.9 pour les 3 couches

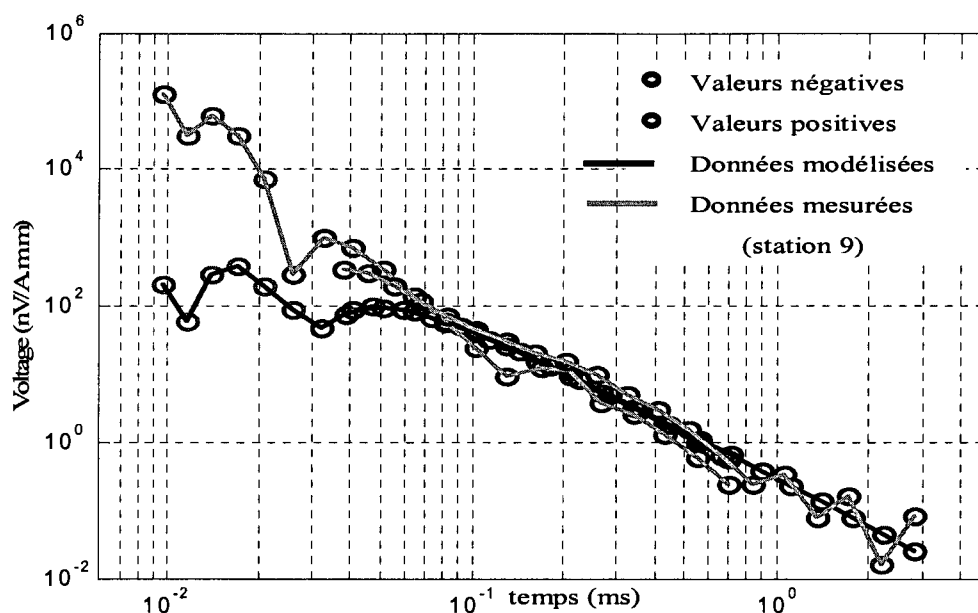


Figure 9.6 : Comparaison des courbes transitoires mesurée (St9) et calculée pour le modèle décrit au tableau avec une chargeabilité m de 0.9 pour les 3 couches

▪ **Effet de la viscosité magnétique sur les mesures transitoires**

La viscosité magnétique est définie comme étant une dépendance fréquentielle de la susceptibilité magnétique, χ , que l'on peut écrire sous la forme suivante (Descloîtres, 1998) :

$$\chi = \chi' - i\chi''$$

où χ' et χ'' représentent respectivement la susceptibilité magnétique en phase et en quadrature de phase.

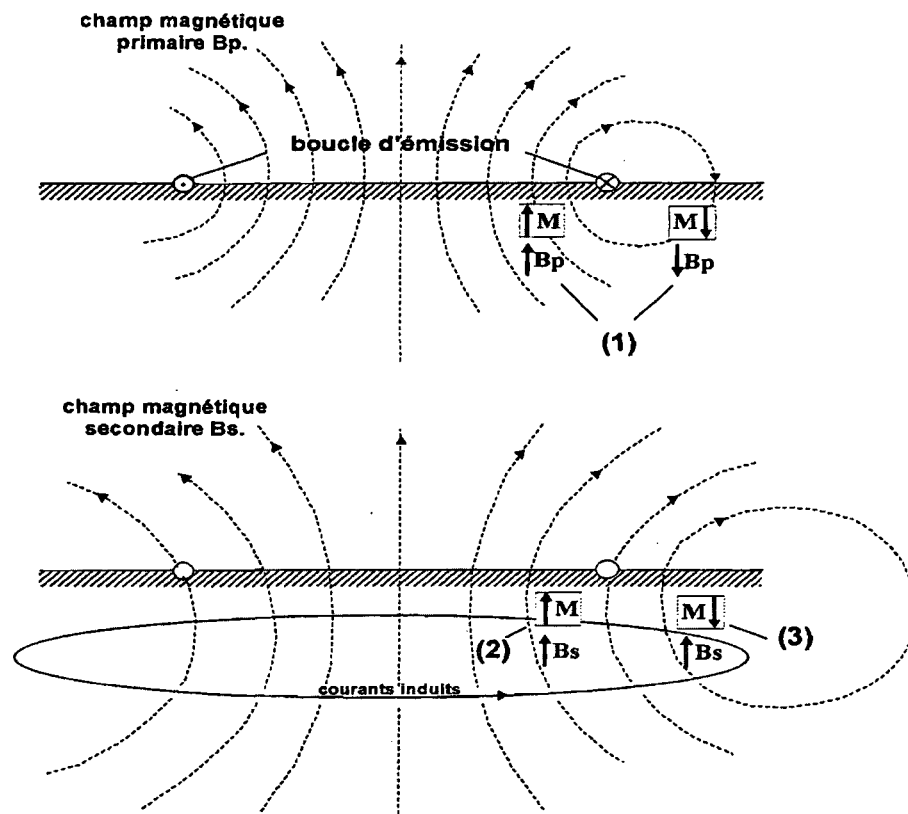


Figure 9.7 : Explication de l'effet de la viscosité magnétique à proximité de la boucle émettrice et réceptrice (dispositif coïncident). M indique l'aimantation acquise pendant l'injection du courant. Les étapes 1 à 3 sont décrites dans le texte (tiré de Descloitres, 1998).

- **Étape 1)** au cours de l'injection du courant, les particules magnétiques s'orientent selon le champ primaire (B_p) en fonction des propriétés magnétiques des particules et de l'intensité du courant injecté. La polarité est définie en fonction de l'endroit où l'on se trouve par rapport au câble de la boucle de transmission. En considérant que l'orientation du champ primaire est positive à l'intérieur et à proximité du câble, l'aimantation (M) des particules serait aussi positive à l'intérieur du câble. À l'extérieur du câble, le champ primaire et l'aimantation sont négatifs.

- **Étape 2)** après la coupure du courant, la relaxation de l'aimantation se fait en gardant une polarité positive à l'intérieur de la boucle émettrice comme le cas du champ secondaire.
- **Étape 3)** au même moment, à l'extérieur et à proximité du câble d'émission-réception, le champ magnétique secondaire induit présente une polarité positive (diffusion des courants de Foucault au delà du câble). Cependant, l'aimantation magnétique garde une polarité négative (inverse de celle du champ secondaire). En conséquence, le champ secondaire mesuré sera la somme de deux parties; une partie due aux courants de conduction et l'autre due à la relaxation de l'aimantation magnétique.

Des travaux antérieurs ont montré que les distorsions, dues à la viscosité magnétique, affectant les mesures transitoires sont identifiables essentiellement à la fin des courbes de sondage comme des variations en t^{-2} à t^{-1} (Buselli, 1982 ; Lee, 1984a). Descloîtres (1998) a effectué un ensemble de modélisations pour évaluer le comportement de l'effet magnétique en fonction des paramètres d'acquisition. Il a conclu que la réponse purement magnétique se présente à la fin du sondage transitoire lorsque les courants de conduction deviennent faibles. Dans ce cas, la pente de décroissance du signal est en fonction du temps d'injection, elle converge vers t^{-2} pour un temps d'injection court et t^{-1} lorsque ce temps est long. Cependant lorsque l'effet de conduction n'est plus négligeable en fin de la mesure transitoire (cas de la présence d'une couche conductrice en profondeur), cet effet peut relever l'amplitude de la courbe mesurée. Également, l'effet magnétique augmente lorsque la taille de la boucle devient faible.

Afin d'évaluer l'effet de la viscosité magnétique sur nos mesures, nous avons conduit quelques modélisations en considérant un modèle de couches tel que décrit dans le tableau 9.1. Les paramètres d'acquisition sont les mêmes que ceux utilisés pour la mesure transitoire sur la halde. Les mesures de la susceptibilité magnétique sur le terrain et au laboratoire sur des carottes issues de la mine ont montré des valeurs variant de 3.10^{-4} à 2.10^{-2} en système SI. La susceptibilité magnétique en quadrature de

phase est 4 à 10 fois inférieure à la susceptibilité magnétique en phase (Descloîtres, 1998). En considérant ces mesures, des valeurs de $2 \cdot 10^{-2}$ et $0.25 \cdot 10^{-2}$ en SI sont respectivement assignées pour la susceptibilité magnétique en phase et en quadrature de phase de la première couche. L'effet de la polarisation provoquée est considéré nul dans ce cas. La figure 9.8 montre les résultats des simulations en comparaison avec un sondage mesuré (St1).

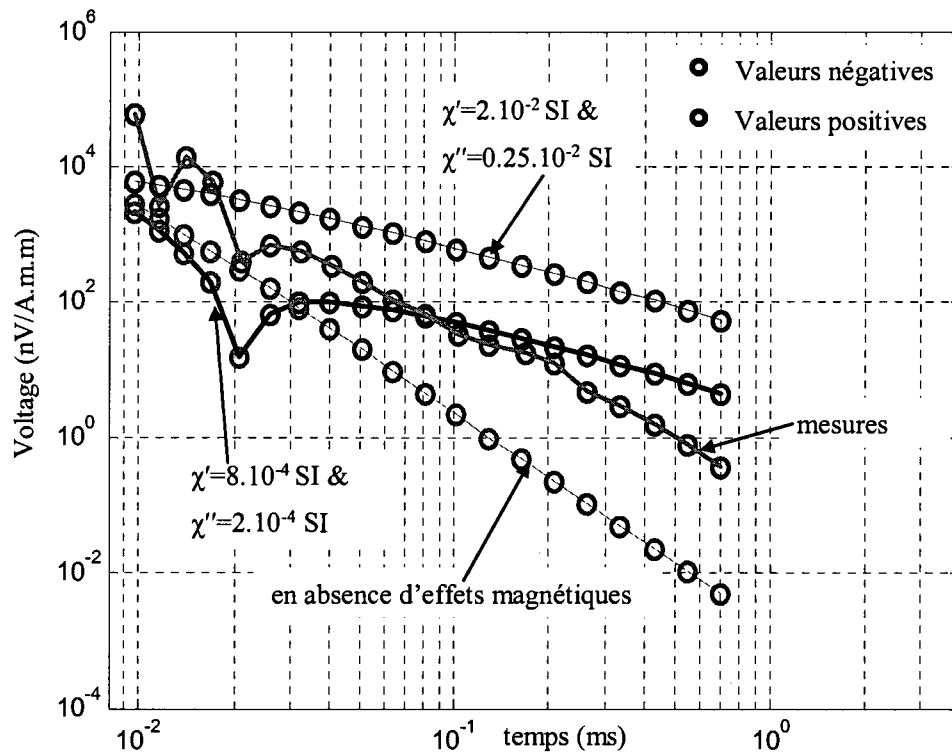


Figure 9.8 : Résultats des simulations numériques, en considérant le modèle décrit au tableau 9.1 avec des susceptibilités magnétiques non nul de la couche superficielle, en comparaison avec le sondage mesuré St1. La configuration à déport latéral de 8.5 m avec une fréquence de 285 Hz sont considérés pour ces simulations.

La courbe en rouge (figure 9.8) montre la réponse calculée en absence d'effet magnétique. La réponse dans ce cas est positive puisque le déport est faible (8.5 m),

les courants de conduction passent rapidement en dessous du récepteur. Cela explique les valeurs positives sur l'ensemble des fenêtres temporelles de la réponse. La courbe en bleu (figure 9.8) montre une simulation en considérant les valeurs de la susceptibilité magnétique telle que décrite sur la figure. On constate que la réponse est négative sur l'ensemble des fenêtres temporelles avec une pente à la fin de la courbe de l'ordre de -1.3. Cela montre que la présence des matériaux avec de fortes susceptibilités magnétiques peut inverser la polarité du signal mesuré. Ceci est probablement dû à la faible taille de la boucle d'émission ainsi que les fortes susceptibilités magnétiques considérées. Une 2^{ème} simulation, avec des susceptibilités magnétiques 25 fois plus faibles, (courbe noir, figure 9.8) montre que la 1^{ère} partie de la courbe (moins de 210^{-2} ms) est légèrement décalée en bas mais ne présente pas une inversion de signe. Au-delà de cette période, la polarité est inversée et l'amplitude absolue est plus importante que la réponse normale (sans effet magnétique). La comparaison des courbes issues des simulations avec la mesure transitoire (exemple : St1) montre des comportements différents (amplitude et pente).

D'après les résultats de ces simulations, il semble que la distorsion des mesures transitoires provient plus de l'effet de polarisation provoquée que de l'effet de la viscosité magnétique. Il n'est cependant pas exclu que les deux effets soient présents dans le cas des sondages effectués sur la halde Petit Pas.

9.2 Mesures radar

En plus des mesures électriques et TDEM, nous avons réalisé des profils radar pour investiguer les structures peu profondes de la halde. Cette approche avait été testée sur la halde de la mine Laronde par Poisson et al (2008). Les résultats obtenus étaient encourageants. Sur la halde Petit Pas, 3 profils radar (plan de localisation donné à la figure 6.4, chapitre 6) d'environ 100 m de longueur ont été acquis en utilisant une fréquence de 100 MHz. Les mesures sont effectuées en mode réflexion avec une trace tout les 10 cm et une sommation de 128 (le profil Ra1, 100 MHz, est enregistré avec un pas de 20 cm). Ce profil a fait aussi l'objet d'une acquisition avec une fréquence de

200 MHz. Étant donné que la vitesse des ondes radar dans les milieux géologiques varie entre 0.06 m/ns à 0.15 m/ns, un temps double de lecture de 150 ns représente une pénétration maximale de 4.5 m à 11 m. Ce temps de lecture s'est avéré suffisant puisque le signal était atténué vers 80 ns. La figure 9.9 montre les données brutes. Ces images montrent que le signal est très atténué (faible profondeur d'investigation).

Une acquisition CMP a été effectuée pour l'analyse de la vitesse et la conversion du temps en profondeur des sections radar. Malheureusement, les traces de cet CMP sont très atténuées et aucune hyperbole de réflexion n'a pu être déterminée.

Pour un matériau hétérogène, avec une granulométrie très étendue tel que les stériles de la halde Petit Pas, les hyperboles de diffractions devraient renseigner sur la taille des hétérogénéités. Cette taille est une fraction de la longueur d'onde (λ) utilisée (Reynolds, 1997). Cette longueur d'onde est proportionnelle à la fréquence, f , du signal radar ($\lambda = V/f$), V étant la vitesse EM de propagation dans le milieu. En considérant une vitesse de 0.1 m/ns, les hyperboles de diffraction devraient déterminer la position des hétérogénéités ayant un diamètre inférieur à 1 m pour une fréquence de 100 Mhz.

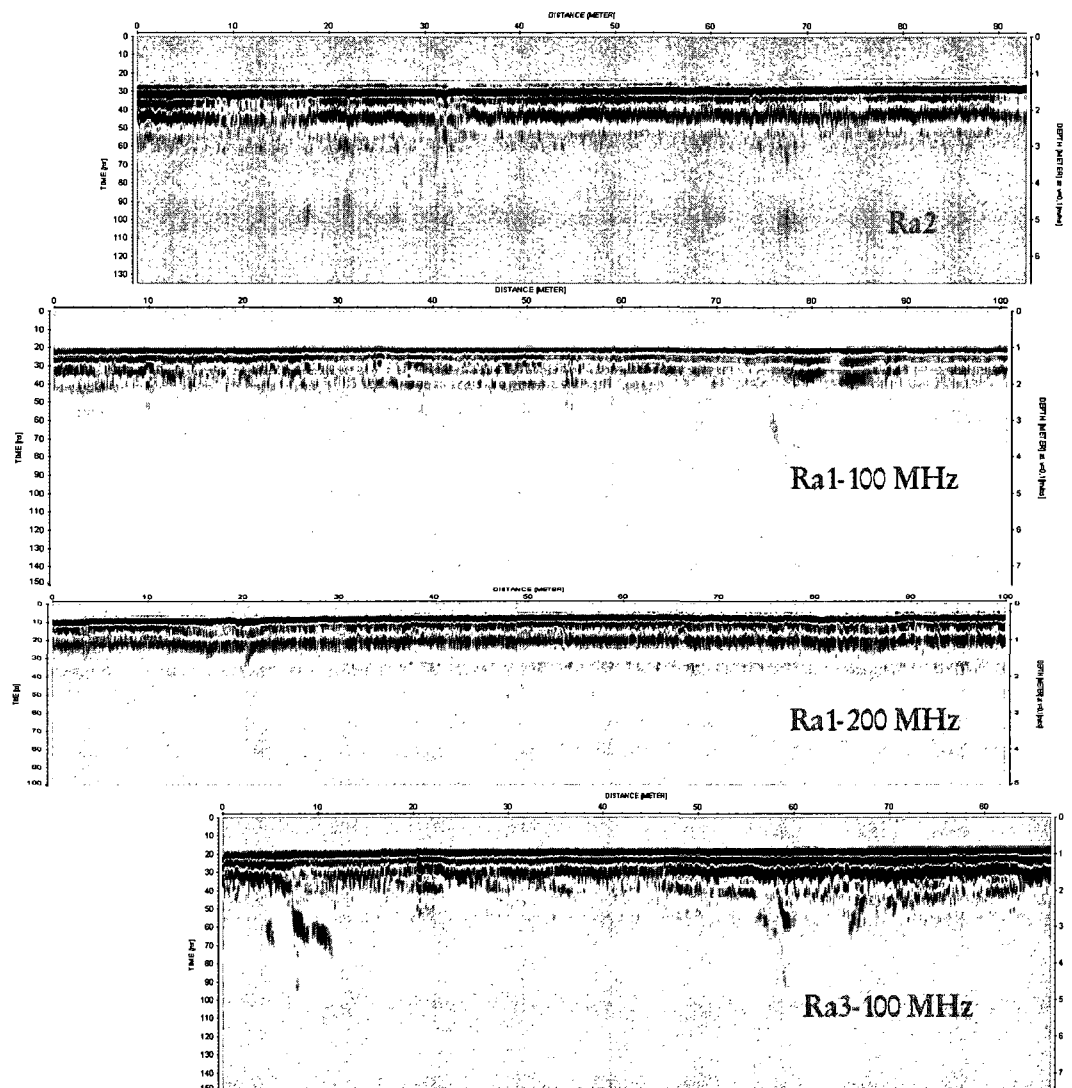


Figure 9.9 : profils radar brutes, investigation en proche surface

Les traitements réalisés ont été effectués à l'aide du logiciel ReflexW (Sandmeier K.J, 2002). Afin de garder le maximum d'informations apportées par les données, le nombre de traitements effectués a été limité à un minimum nécessaire (a à d).

a- Filtre Dewow : Ce filtre permet de supprimer une dérive de basse fréquence en prenant comme argument une fenêtre temporelle de l'ordre de la période principale

correspondant à l'inverse de la fréquence utilisée (par exemple, 10 ns et 5 ns pour 100 Mhz et 200 Mhz respectivement).

b- Correction statique : Toutes les amplitudes des premières arrivées du profil, aériennes ou directes, doivent être alignées horizontalement. En effet, en mode réflexion, l'espacement Tx-Rx reste constant et la vitesse de propagation des ondes aériennes est aussi constante. Un décalage temporel des premières arrivées est donc un défaut expérimental. Pour remédier à cette situation, les premières arrivées sont marquées à l'aide de la méthode du pointé, ce qui permet d'aligner les traces horizontalement.

c- Application d'un gain : La fonction de contrôle du gain automatique (AGC) a été choisie pour compenser l'atténuation du signal radar avec la profondeur. Cette fonction permet d'appliquer un gain pour chaque échantillon en temps au lieu de la trace toute entière. Au début, l'amplitude moyenne est calculée sur l'ensemble des échantillons d'une fenêtre temporelle prédéfinie par l'utilisateur. La moyenne calculée est assignée à un échantillon précis de la fenêtre définie. La même procédure est suivie en déplaçant chaque fois la fenêtre d'un échantillon le long de la trace. Le choix de la longueur de la fenêtre est important, une petite longueur signifie que la répartition des amplitudes sera uniforme tandis qu'une grande longueur ne produit pas de modification des amplitudes.

Toutefois, l'application de ce contrôle de gain automatique peut fausser l'interprétation en donnant des amplitudes importantes à des interfaces moins évidentes.

d- Filtrage fréquentiel dans le domaine temporel " Bandpass Butterworth"

Ce filtre permet de réaliser un filtre fréquentiel récursif dans le domaine temporel. Il est généralement utilisé à la fin pour supprimer les signaux extérieurs à la bande passante du radar. Pour ce filtre, l'utilisateur définit les fréquences de coupure basse et haute.

La figure 9.10 montre les profils après la réalisation de la séquence de traitements définie ci- dessus.

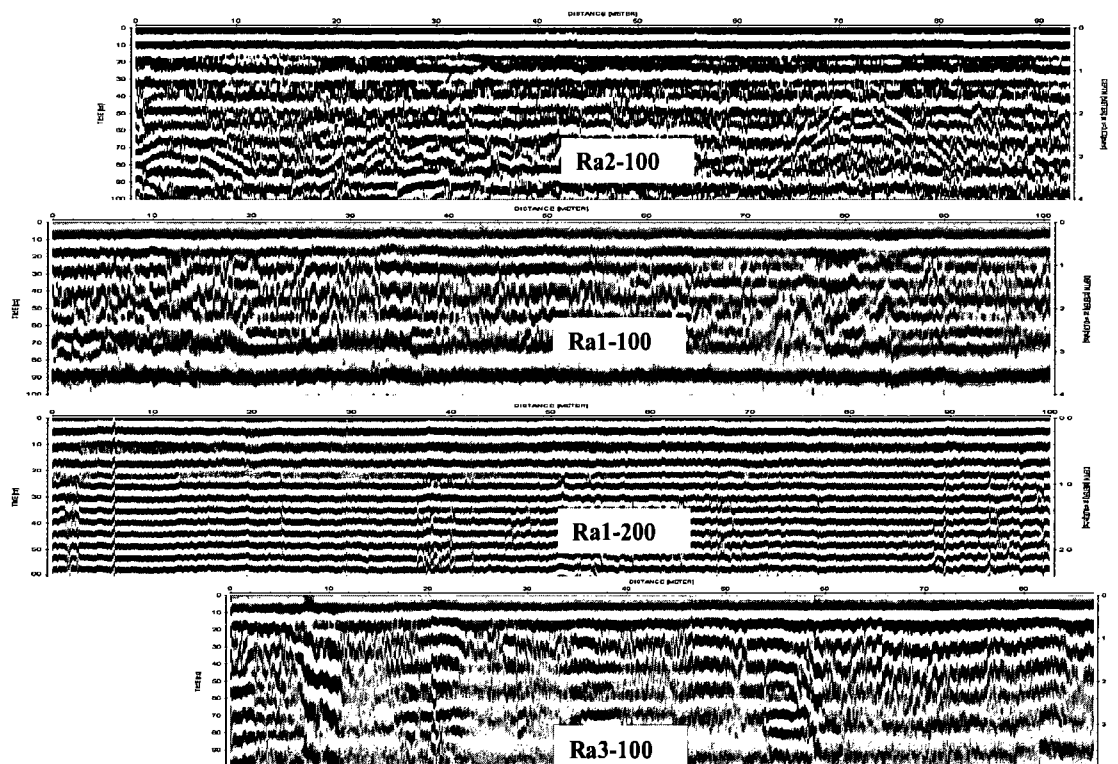


Figure 9.10 : Sections radar après traitement

L'analyse des sections radar traitées montre qu'il est difficile de distinguer des réflecteurs qui peuvent être associés à des structures dans la halde. L'onde aérienne apparaît vers 3 ns suivie de l'onde directe qui se propage directement, entre l'émetteur et le récepteur, dans le matériau de la halde. Cette dernière apparaît vers 10 ns. Après ces deux types d'ondes, les sections montrent des réverbérations (réflexions multiples entre émetteur et récepteur) et des réflexions non cohérentes (bruits). On note aussi la présence de quelques hyperboles de diffraction avec une vitesse de 0.3 m/ns (profils Ra3). Les antennes utilisées, non blindées, émettent par défaut aussi bien dans l'air que dans le sol. Cela indique que probablement ces hyperboles sont causées par des objets en surface. Le profil Ra2 montre des zones où le signal est très atténué. Les

mesures électriques réalisées sur ce profil montrent que la résistivité est élevée dans ces endroits, plus que 500 Ω .m. Cela indique que cette atténuation pourrait être due à la très grande hétérogénéité du matériau qui disperse l'énergie ainsi qu'à une absorption du signal par des structures conductrices (la résistivité EM est plus faible que la résistivité galvanique).

Annexe 2 : CD ROM joint contient toutes les annexes citées dans le mémoire avec l'ensemble de fichiers de mesure bruts, la topographie des levées, les fichiers d'inversion 2D, 3D.